



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio de proceso de fabricación por deformación
plástica mediante Elementos Finitos

Finite element study of manufacturing process by
plastic deformation

Autor/es

Javier Millán Luna

Director/es

José Manuel Franco Gimeno

Universidad de Zaragoza/ Escuela de ingeniería y Arquitectura

2016

Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zaguán

<http://zaguán.unizar.es>



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Javier Millán Luna,

con nº de DNI 73014302C en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
en Ingeniería Mecánica, (Título del Trabajo)

Estudio de proceso de fabricación por deformación plástica mediante
Elementos Finitos

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada
debidamente.

Zaragoza, 25 de noviembre 2016

Fdo: Javier Millán Luna

RESUMEN	7
ABSTACT	7
1 INTRODUCCIÓN.....	8
2 OBJETIVOS.....	10
3 SIMULACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES	11
3.1 ANÁLISIS 1: INFLUENCIA DEL CANAL DE REBABA EN ESFUERZOS. .	11
3.1.1 Definición del modelo computacional	12
3.1.1.1 Diseño de pieza y utillajes.....	12
3.1.1.2 Material.....	15
3.1.1.3 Rozamiento.....	17
3.1.1.4 Condiciones de contorno	18
3.1.1.4.1 Utillajes.....	18
3.1.1.4.2 Pieza	19
3.1.1.5 Mallado.....	19
3.1.1.5.1 Utillajes.....	20
3.1.1.5.2 Pieza	20
3.1.2 Procesado	21
3.1.3 Resultados	22
3.1.3.4 Reacciones	22
3.1.3.4 Tensiones Von Mises	26
3.1.4 Conclusiones	30
3.2 ANÁLISIS 2: INFLUENCIA DEL CANAL DE REBABA EN EL CORRECTO LLENADO DE LA MATRIZ.....	31
3.2.1 Definición del modelo computacional	31
3.2.1.1 Diseño de pieza y utillajes.....	31

3.2.1.2 Condiciones de contorno	32
3.2.2 Definición variables de cálculo.	33
3.2.3 Resultados.	33
3.2.3.1 Llenado de estampas.....	33
3.2.3 Conclusiones.	36
4 CONCLUSIONES.....	37
ANEXO I. PROCESO DE CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA.	
FORJA.....	39
1 INTRODUCCION Y CLASIFICACION DE LA FORJA.....	39
2 TIPOLOGIA DE PRENSAS	41
2.1 Prensas.....	42
2.2 Martillos	44
3 COMPORTAMIENTO ENERGETICO.....	45
3.1 Martillos	45
3.2 Prensas.....	45
4 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE FORJA	46
5 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA DEFORMACION	48
6 SECUENCIA DE OPERACIONESDE FORJA.....	51
7 INFLUENCIA DEL ROZAMIENTO EN EL LLENADO DE LA MATRIZ	51
ANEXO II. DISEÑO DE FORJA CERRADA CON REBABA	
1 DISEÑO DE ESTAMPAS.....	56
2 LA REBABA	58
3 LOCALIZACIÓN DEL CANAL DE REBABA.....	58
4 DIMENSIONES DE LA REBABA	59
ANEXO III. RESULTADOS.	61

1 RESULTADOS DEL ANALISIS I	61
1.1 Canal de rebaba 1 mm.	61
1.1.1 Fuerzas de reacción	61
1.1.2 Tensiones Von Mises.....	62
1.2 Canal de rebaba 2 mm.....	63
1.2.1 Fuerzas de reacción	63
1.2.2 Tensiones Von Mises.....	64
1.3 Canal de rebaba 2.25 mm.....	66
1.3.1 Fuerzas de reacción	66
1.3.2 Tensiones Von Mises.....	¡Error! Marcador no definido.
1.4 Canal de rebaba 2.5 mm.....	68
1.4.1 Fuerzas de reacción	68
1.4.2 Tensión Von Mises.....	69
1.5 Canal de rebaba 2.75 mm.....	71
1.5.1 Fuerzas de reacción	71
1.5.2 Tensión Von Mises.....	72
1.6 Canal de rebaba 3 mm.....	73
1.6.1 Fuerzas de reacción	73
1.6.2 Tensión Von Mises.....	74
1.7 Canal de rebaba 4 mm.....	76
1.7.1 Fuerzas de reacción	76
1.7.2 Tensión Von Mises.....	77
1.8 Canal de rebaba 5 mm.....	78
1.8.1 Fuerzas de reacción	78

1.8.2Tensión Von Mises	79
1.9Canal de rebaba 6 mm	81
1.9.1Fuerzas de reacción	81
1.9.2Tensión Von Mises	¡Error! Marcador no definido.
1.10Comparativa de las fuerzas de Reacción.....	83
2 RESULTADOS ANALISIS II.....	87
2.1Canal de rebaba 1 mm.....	87
2.2Canal de rebaba 2 mm.....	87
2.3Canal de rebaba 3 mm.....	88
2.4Canal de rebaba 4 mm.....	88
BIBLIOGRAFÍA	89

RESUMEN

El presente trabajo realiza un estudio mediante simulación computacional por Elementos Finitos del proceso de forja en caliente, mediante el empleo del paquete Abaqus CAE, un software especializado en el cálculo de elementos finitos, y la implementación de un diseño 2D mediante Abaqus CAE. Se considera el comportamiento del material en el llenado de la matriz, así como la fuerza a realizar por la prensa dependiendo de los diferentes canales de rebaba. Para el estudio se simulará el proceso de forja de una piza axisimétric, partiendo tanto de un elemento en bruto como de un elemento preformado. Con el objetivo de aportar conocimiento del comportamiento de la forja dependiendo de su diseño.

ABSTRACT

The present work makes a software study by Finite Elements about hot forging process using the program Abaqus/CAE, a software speacialized in finite elements calculation and in the development o 2D model desing. The material's performance in the filling of the mould, as well as the strength that has to do press, depends on the differents canal's burr. The study simulates the process of forging a axisimetric part, both for rough element. With the objective of providing knowledge about forge's performance depending on their design.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día prácticamente todo lo que nos rodea procede de la manufactura, desde el más simple interruptor hasta cada una de las piezas del motor de un automóvil. Como sabemos la manufactura consiste en los procesos para transformar las materias primas en productos con un valor para el destinatario final.

“El nivel de manufactura de una nación se relaciona directamente con su salud económica; por lo general, cuanto mayor es la actividad manufacturera de un país, mayor será el estándar de vida de su gente.”[8]

De tal forma, es comprensible que día tras día, se diseñe o investiguen tanto nuevas formas de manufacturación, como posibles mejoras de las actuales. Con el objetivo final de conseguir una pieza final con el mejor resultado de calidad-precio.

Dicha búsqueda constante de nuevos métodos genera una mejora continua en los avances en las áreas de ahorro de costes y materiales y en el perfeccionamiento de la pieza final. Haciendo uso de los avances de la tecnología, para lograr el objetivo, se llevan a cabo investigaciones sobre los materiales y procesos de manufactura, tanto experimental como computacionalmente.

En el caso que nos ocupa, nos centraremos en el estudio de uno de los procesos de manufactura más populares y que más volúmenes de pieza produce mediante conformado plástico, la forja.

Para lograr un resultado exitoso, y no lidiar con piezas finales no válidas, es vital la correcta elección y diseño de todos los elementos de la forja, por lo tanto es imprescindible el uso de las nuevas tecnologías, para ello nos podemos apoyar en los programas de cálculo numérico, como pueden ser SolidWorks, Abaqus, Ansys... Ello nos permite tener una visión cercana a lo que ocurriría durante un proceso real, permitiéndonos ahorros en el uso de material y reducción de pérdidas por piezas defectuosas mediante los ensayos experimentales.

Los procesos de conformado plástico por forja se emplean en la fabricación de un gran porcentaje de piezas mecánicas debido a sus buenos resultados finales, estos se basan en un reducido porcentaje de rechazo, buenos acabados superficiales y en la mejora de propiedades mecánicas entre otros. Debemos tener en cuenta que existen diversos tipos de conformado plástico por forja, una de sus clasificaciones más amplias es la siguiente:

- Forja con matriz abierta: es caracterizada por poseer sus matrices planas y provocar una libre deformación de la pieza en las direcciones perpendiculares al avance de la matriz. Provocan esfuerzos de compresión en la dirección del movimiento generando un acortamiento y el abarilamiento de la pieza, debido al principio de conservación de volumen. Un subtipo de matriz abierta podría considerarse la forja localizada incremental, donde mediante un punzón se procede a la deformación de la pieza, obteniendo la forma gradualmente de la matriz o molde inferior.
- Forja con matriz cerrada o con estampa: Sus estampas tienen la forma en negativo de la pieza final y prácticamente el total del volumen a conformar queda dentro de la estampa. El material tiende a fluir hasta rellenar todas las cavidades de la matriz. Podemos distinguir dos tipos: con rebaba o sin rebaba. Siendo la rebaba el material que queda atrapado entre las dos matrices y no pertenece a la pieza.

El correcto diseño de las matrices de conformado es vital, tanto por su influencia en el coste final del producto, como en la calidad de la pieza final y en la vida útil de las mismas. Este aspecto del proceso de manufactura, afectará directamente a la fuerza realizada por la forja, el correcto flujo de material y el completo llenado de la matriz; así como en la posible aparición de defectos en la pieza final o en el peor de los casos el rechazo.

A la hora de diseñar correctamente la matriz de forjado, un parámetro de gran repercusión en el resultado final de la pieza, así como en su proceso de deformación, es el canal de rebaba. El flujo de material sobrante recorrerá dicho canal, puesto que se trata de una sección considerablemente más estrecha que el resto del proceso y el enfriamiento del material se produce a una velocidad superior, puede producirse un bloqueo de la salida del material sobrante debido a la mayor resistencia en este punto y producirse defectos en la pieza final. Por otro lado un canal de rebaba sobredimensionado podría ofrecer poca resistencia al flujo de material ofreciendo una salida fácil y provocando faltas de llenado en la matriz, dando por resultado una pieza final defectuosa. Por lo tanto, el reto en su correcto diseño se basa en ajustar la dimensión de tal forma que presente una mayor dificultad del flujo de material para facilitar el correcto llenado de las partes críticas.

Volviendo al tema principal de mejora continua en los procesos de manufactura, el objetivo del presente proyecto busca aportar un conocimiento adicional sobre el comportamiento del material a la hora del llenado de la matriz, dependiendo del diseño del canal de rebaba. Para ello se realizará una secuencia de simulaciones mediante modelos computacionales, variando en el diseño la dimensión del canal de rebaba siendo 1, 2 y 3 mm los valores elegidos. Para ello nos apoyaremos principalmente en el programa de cálculo de elementos finitos Abaqus CAE, con el fin de estudiar sus distintos resultados en cuanto a fuerzas y deformaciones.

2 OBJETIVOS

En el presente documento se realiza un análisis de la influencia del espesor del canal de rebaba en un proceso de deformación en caliente de forja, haciendo uso de un programa de cálculo de elementos finitos genérico. Teniendo en cuenta las limitaciones de un programa genérico, no se podrá dar una respuesta completamente cercana a la realidad como podrían ofrecer otros programas específicos especializados en este campo.

Ante la imposibilidad de poder cotejar nuestro modelo frente a un ensayo real, no es posible determinar el porcentaje de error generado en los resultados de nuestra simulación.

Por lo tanto, una vez determinado el marco de ensayo en el que nos encontramos se diseñan dos situaciones distintas. En la primera, estamos frente a una simulación que posee una geometría sencilla, cuyo objetivo será analizar las fuerzas ejercidas por las estampas, así como la distribución de tensiones en la pieza final. En la segunda, sometemos al material a una geometría más compleja, cuya finalidad es encontrar defectos en la falta de llenado de la estampa a medida que aumenta el espesor del canal de rebaba.

3 SIMULACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES

3.1 ANÁLISIS 1: INFLUENCIA DEL CANAL DE REBABA EN ESFUERZOS.

Durante el desarrollo de este primer caso de estudio, se plantearán diversas simulaciones de un proceso de forja mediante un software genérico, en las cuales se estudiará el comportamiento de una geometría sencilla según la variación del espesor (ϵ) de su canal de rebaba.

En dicha simulación, se procederá a deformar una pieza cilíndrica sin preformar constituida por acero SAE1151.

El objetivo es analizar y comparar los siguientes valores para cada simulación, pudiendo realizar conclusiones respecto a su comportamiento según sus resultados:

- Fuerzas de reacción soportadas por la matriz. Al analizar este valor, se pretende estudiar las fuerzas máximas solicitadas por la estampa en cada simulación. Permitiéndonos intentar valorar la situación más favorable para la deformación del material.
- Tensiones de Von Mises. Se analizará la evolución de su distribución en la pieza final conforme se aumenta el espesor del canal de rebaba.

- Deformaciones generadas.

Los espesores de los canales de rebaba a estudiar son:

Simulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε (mm)	1	2	2.25	2.5	2.75	3	4	5	6

Tabla 1 Espesores de canal de rebaba

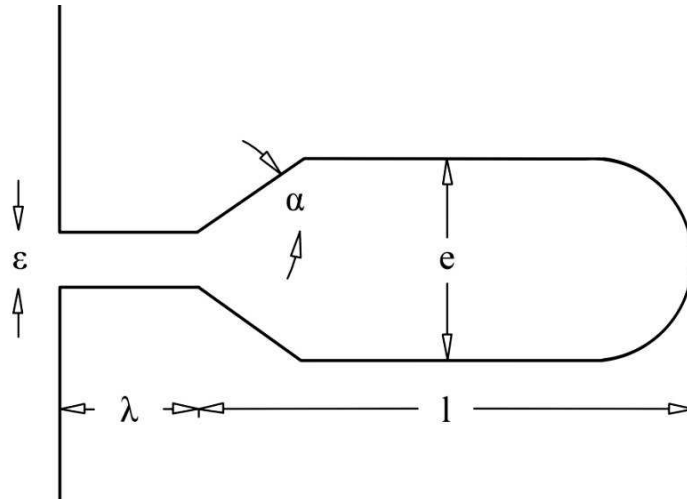


Fig. 1 Geometría canal de rebaba

3.1.1 Definición del modelo computacional

3.1.1.1 Diseño de pieza y utillajes.

La geometría de la pieza se diseña en un modelo 2 dimensiones, debido a su condición de simetría respecto al eje “y” el estudio se realizará en condiciones de axisimetría, generando un importante ahorro en el coste computacional.

El modelo a simular consta de 3 partes ó sólidos, cada una de ellas definida individualmente:

- Estampa superior. Se define como un elemento rígido discreto axisimétrico. En este tipo de elementos es necesario definir un punto de referencia (RP)

con el objetivo de definir sus condiciones de contorno. Evitando de esta manera el giro y la inercia del cuerpo a la hora del desplazamiento.

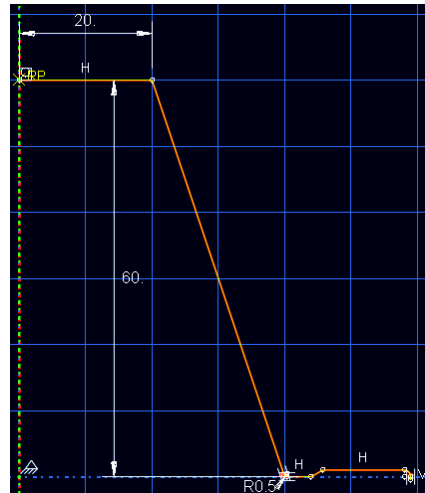


Fig. 2 Dimensiones estampa superior

- Estampa inferior. De igual manera es definido como elemento rígido discreto axisimétrico. Puesto que esta estampa se encuentra empotrada, no es necesario definir un punto de referencia.

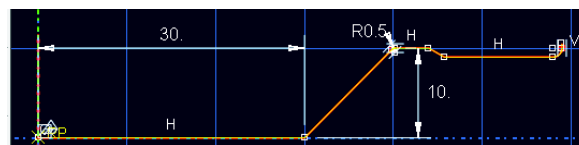


Fig. 3 Dimensiones estampa inferior

- Preforma Tocho. Es definido como una lámina, denominado así por el programa en su condición de 2D, deformable axisimétrica. Puesto que consiste en la parte deformable de la simulación, en este elemento se deberán definir otras variables, tal como su sección o el material.

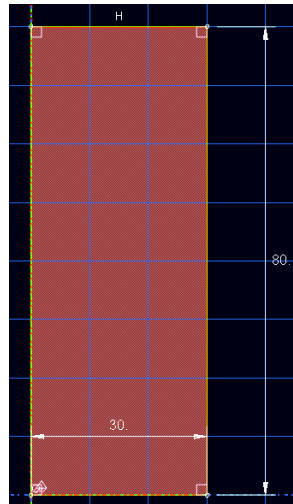


Fig. 4 Dimensiones preforma

Como se ha comentado anteriormente, nos centraremos como variable independiente en la variación del espesor del canal de rebaba. Para el correcto diseño del canal de rebaba y el alojamiento de la rebaba, nos apoyaremos en los criterios mostrados en el ANEXO II. Quedando las dimensiones recogidas en la siguiente tabla:

Espesor	1	2	2.25	2.5	2.75	3	4	5	6
ε (mm)	2-3	4-6	4.5-6.5	5-7.5	5.5-8	6-9	8-12	10-15	12-18
A	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°
λ (mm)	4-7	8-14	9-15	10-17	11-19	12-21	16-28	20-35	24-42
L(mm)	16	30	36	40	44	48	64	80	96

Tabla 2 Dimensiones de canal de rebaba según espesor

Una vez definidas todas las dimensiones, se procede a ensamblar el modelo. Quedando finalmente de la siguiente forma.

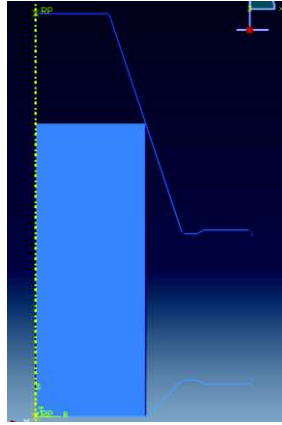


Fig. 5 Modelo ensamblado

3.1.1.2 Material

Como anteriormente se ha mencionado, el material elegido para las simulaciones es el acero SAE 1151. Para la definición de su comportamiento se han introducido los siguientes elementos [2]:

- Densidad: $7.85 \cdot 10^{-6} \text{Kg/mm}^3$
- Propiedades de elasticidad:
 - I. Modulo de Young: 200000 MPa
 - II. Coeficiente de Poisson: 0.29
- Curva plástica: en ella se muestran pares de valores tensión-deformación con el fin de conocer el comportamiento plástico del material. Para hallar este par de valores haremos uso del documento presente en la bibliografía [5], en el cual se definen las curvas de tensión cizalladura-deformación a temperaturas de 900° y 1000°, a distintas velocidades de deformación tal y como se puede observar en la siguiente gráfica:

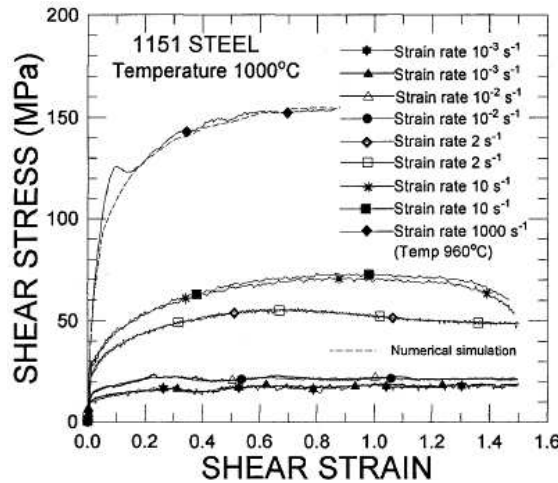


Fig. 6 Curva tensión deformación SAE 1151 [5]

Mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\sigma_m = \left(35.47 + 188.5 * e^{\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3.4194} \ln \frac{\gamma_p}{2.152} \right)^2 \right)} \right) \left(1 + 0.096 \ln \left(\frac{\gamma'_p}{\gamma'_o} \right) \right) (1 - T^{1.23})$$

[5]

Se obtienen los valores de tensión-deformación normal, para ello empleamos los datos de la gráfica correspondiente a una temperatura de 1000°. Debido a que nos encontramos frente a una rápida deformación los esfuerzos ejercidos son mayores y por lo tanto se tomarán valores pertenecientes a la curva con un strain rate de 1000 s⁻¹, a la que corresponden los valores de mayor magnitud.

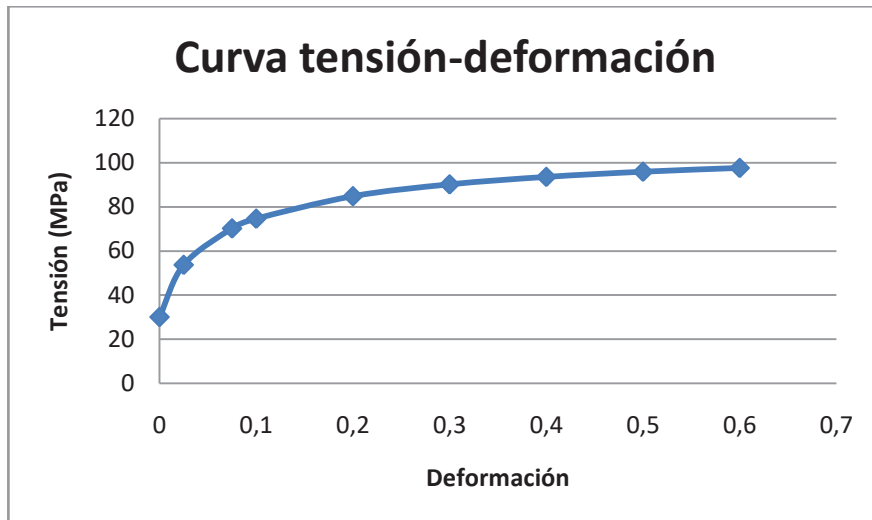


Fig. 7 Curva tensión deformación SAE 1151 obtenida

La curva tensión-deformación es considerada constante a lo largo de toda la simulación, ya que, debido a la velocidad que se produce, tomamos como nula la transferencia de calor durante el proceso, es decir se considera un proceso adiabático. Por ello la pieza no sufre tensiones debido a contracciones producidas por el enfriamiento en el transcurso de la simulación.

3.1.1.3 Rozamiento

La interacción entre las distintas partes del proyecto se ha de definir de manera cuidadosa, para un correcto funcionamiento del modelo computacional. De manera contraria el programa podría no converger o dar una solución no exacta.

Procedemos a definir las propiedades de las interacciones entre el tocho y las dos estampas, puesto que las estampas no llegan a mantener un contacto no será necesario definirlo. Se definirá la interacción entre las superficies como un contacto con comportamiento tangencial (“tangencial behaviour”), eligiendo una formulación de punto de penalti (“friction formulation: penalty”), de tal manera que nos permite definir el coeficiente de fricción. Suponiendo las estampas fabricadas con acero, tenemos un contacto de acero contra acero, de esa manera empleando un lubricante de grafito obtenemos el siguiente coeficiente de fricción [4]

Coeficiente de fricción (μ)	0.15
-----------------------------------	------

Tabla 3 Coeficiente de fricción

Una vez definidas las propiedades de la interacción, se ha de definir cada contacto individualmente entre las superficies, es decir, estampa superior-tocho y estampa inferior-tocho. Se selecciona un contacto general (“general contact”), eligiendo como subtipo superficie contra superficie (“surface to surface (explicit)”). Puesto que el tocho ha de deslizarse sobre las estampas, se definen las mismas como superficies maestras, o primarias, y el tocho como superficie esclava, o secundaria. Finalmente seleccionamos como formulación “penalty contact method” debido a su menor número de restricciones a la hora de calcular contactos entre superficies, como puede ser entre dos cuerpos rígidos.

3.1.1.4 Condiciones de contorno

Con objetivo de definir el comportamiento respecto al movimiento de las partes en la simulación, se han de definir las condiciones de contorno, o “boundary conditions”, de la siguiente forma:

3.1.1.4.1 Utillajes

- Molde superior, sus condiciones de contorno serán definidas en el punto de referencia antes definido. Debido a que esta parte debe tener libertad de movimiento en el eje Y, se le asigna una condición de XSYMM la cual define $U1=UR2=UR3=0$, es decir impide el desplazamiento en X y los giros en Y y Z. Además en el mismo punto de referencia se le aplica un desplazamiento en el eje Y de dirección negativa y amplitud Tabular, el cual genera el movimiento de compresión.
- Molde inferior, esta pieza debe permanecer firme y rígida sin sufrir desplazamiento ni giro alguno, por ello se aplica la condición de ENCASTRE en toda su superficie, esta condición impide los movimientos y giros en todas sus direcciones.

3.1.1.4.2 Pieza

- Preforma, puesto que está definido como un modelo axisimetrico y tiene definidas las condiciones de contacto con las otras dos superficies, no es necesario aplicar condiciones de contorno adicionales, ya que su movimiento se verá definido por el rozamiento de las otras superficies.

3.1.1.5 Mallado

En el presente apartado, procederemos a realizar un análisis de la sensibilidad del mallado, con el fin de elegir la dimensión más acertada para el cálculo. Evitando de esta forma largos periodos de cálculo que no aporten mayor claridad a la resolución del problema, o al contrario, obtener un mallado demasiado grueso el cual no reflejaría la realidad.

Una vez determinada la dimensión de los elementos se procederá a explicar el mallado de utillajes y pieza.

Para ello se ha procedido a realizar los cálculos para una misma simulación, en este caso para el canal de rebaba 1mm, seleccionando las siguientes dimensiones de mallado:

Mallado (mm)	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5
Nº elementos	600	782	1060	1536	2400	4280	9600
RF (N*e7)	5.35	4.66	4.16	3.46	3.3	3.144	2.808

Tabla 4 Resumen datos obtenidos en la sensibilidad del mallado

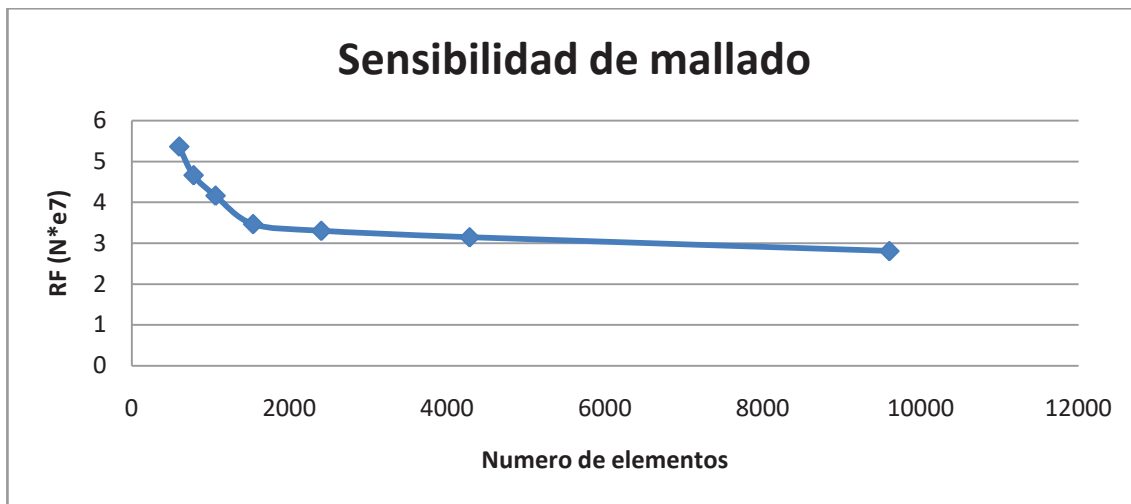


Fig. 8 Evolución de la fuerza de reacción según mallado

Finalmente, una vez analizado los resultados de las simulaciones, se elige como dimensión de los elementos 0.5mm, es considerado que dicha dimensión proporciona un valor de alta fiabilidad, puesto que si se observa la evolución de la curva de sensibilidad, apenas existe variación en las últimas simulaciones.

3.1.1.5.1 Utillajes

El mallado de las estampas, tratándose de cuerpos rígidos discretos, no supone una importancia relevante para el cálculo de los resultados en la simulación, debido a que no sufren deformación alguna durante el proceso. En este tipo de piezas, empleamos los elementos RAX2, que consisten en elementos lineales de 2 nodos rígidos y axisimetricos. Como se ha comentado, no tienen importancia a la hora de obtener resultados, no obstante es conveniente que su mallado no sea excesivamente grueso, por ello se les da una dimensión de 0.5, con el fin de coincidir con los elementos del tocho.

3.1.1.5.2 Pieza

Para el caso del tocho a deformar, el mallado se realizó mediante los elementos CAX4R, elementos de 4 nodos bilineales axisimetricos cuadriláteros, con integración reducida y hourglass control. El control de distorsión se definió con un valor de 0.2, con el fin de evitar elementos con una distorsión excesiva. Los elementos tienen una dimensión de 0.5mm por lado, dando un total de 9600 elementos en la parte.

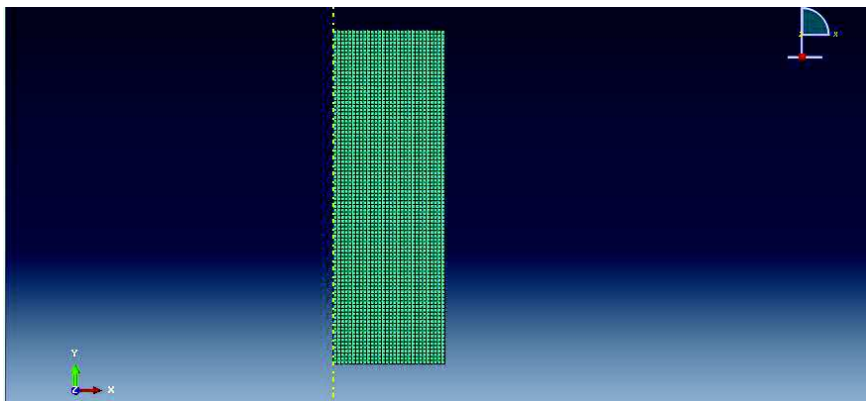


Fig. 9 Mallado del tocho

3.1.2 Procesado

A la hora de definir los pasos de cálculo, o steps, en el paquete Abaqus CAE no se debe introducir todos los datos en un mismo step, o el programa podría no converger.

De tal forma, siempre existe un primer paso, o step initial, en el que se indican todas las interacciones entre superficies que soportará la simulación, así como las condiciones de contorno o “boundary conditions”

Con el fin de definir las cargas a las que se va a someter la simulación, hemos de generar un nuevo “step” para su procesamiento. De esta forma, creamos el nuevo “step” denominado desplazamiento, en el cual se llevarán a cabo todas las cargas a las que se someta la simulación.

Dicho “step” será denominado “desplazamiento” y definido como “dynamic, explicit”, en el cual se efectuará el desplazamiento de la estampa superior. Para emplear este “step”, el desplazamiento debe tener definida y asignada una magnitud, como se ha mencionado en el apartado “condiciones de contorno”, se define una amplitud tabular. Para definir esta amplitud se le debe indicar pares de valores, un instante en el tiempo y la amplitud del movimiento alcanzado.

Se definió de la siguiente manera:

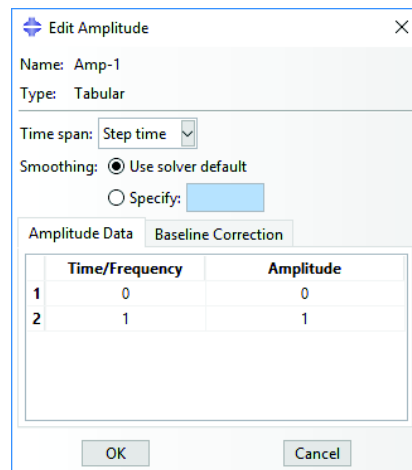


Fig. 10 Definición en Abaqus de la amplitud del desplazamiento

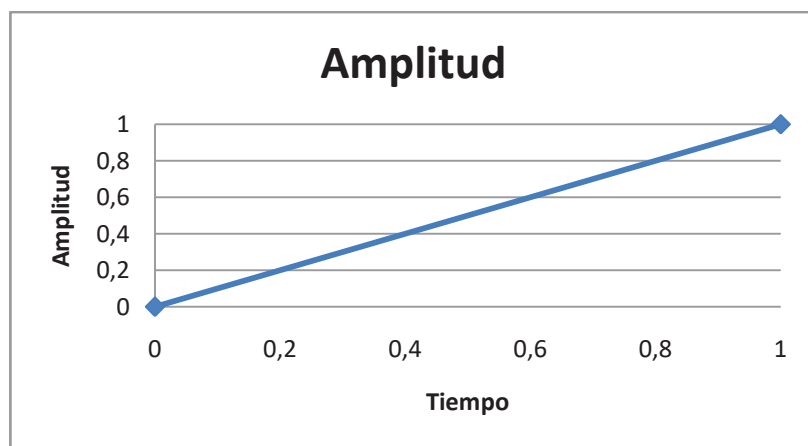


Fig. 11 Evolución del desplazamiento en el tiempo

Esta definición nos indica que el movimiento tendrá lugar de una forma continua a lo largo de la simulación, desplazándose a cada instante a la misma velocidad.

3.1.3 Resultados

3.1.3.4 Reacciones

Con objetivo de cuantificar el efecto que posee el canal de rebaba sobre la carga de la estampa, se procedió a determinar las fuerzas de reacción ejercidas por la estampa superior y a analizar sus valores máximos.

En primera instancia, se realizaron las simulaciones variando el espesor del canal de rebaba en 1, 2 y 3 mm. Obteniéndose los siguientes resultados:

Espesor (mm)	Reacción (MN)
1	28.08
2	23.8
3	5.395

Tabla 5 Fuerzas de reacción espesores 1 a 3 mm

Mediante estas primeras simulaciones, se pudo observar que los resultados no eran proporcionales a la variación de espesores, así mientras que el incremento de un espesor de 1 mm a 2 mm reducía la fuerza necesaria en aproximadamente un 14%, sin embargo al variar el espesor a 3 mm se generaba una reducción de la fuerza necesaria en un 77% respecto a su valor anterior para 2 mm.

Debido a esta observación, se decidió proceder con simulaciones de tres valores intermedios entre 2 y 3 mm: 2.25, 2.5 y 2.75 mm. Asimismo se procesaron simulaciones adicionales con espesores de valor superior a 3 mm con los espesores 4, 5 y 6 mm, con el objetivo de comprobar la evolución de fuerzas. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Espesor (mm)	Reacción (MN)	% reducción
1	28.08	-
2	23.33	16.9
2.25	12.27	47.4
2.5	8.316	32.2
2.75	7.113	14.4
3	5.395	14.2
4	4.686	13
5	3.808	18.7

6	3.499	8.11
---	-------	------

Tabla 6 Fueras de reacción

Una vez analizados los resultados de las simulaciones, podemos determinar que la anomalía sucede únicamente ante al paso de 2 a 3 mm en el espesor, recuperando una reducción más gradual en los valores posteriores a 3 mm, existiendo una media de porcentaje de reducción del 13%.

A su vez, podemos observar que la rápida reducción de fuerza empleada tiene su inicio en el punto medio del paso de 2 a 3 mm de espesor, comprobando que disminuye mas aceleradamente en los valores 2.25mm y 2.5 mm.

En las siguiente gráfica podemos ver el resumen de la evolución en la fuerza necesaria, así como su evolución en el tiempo:

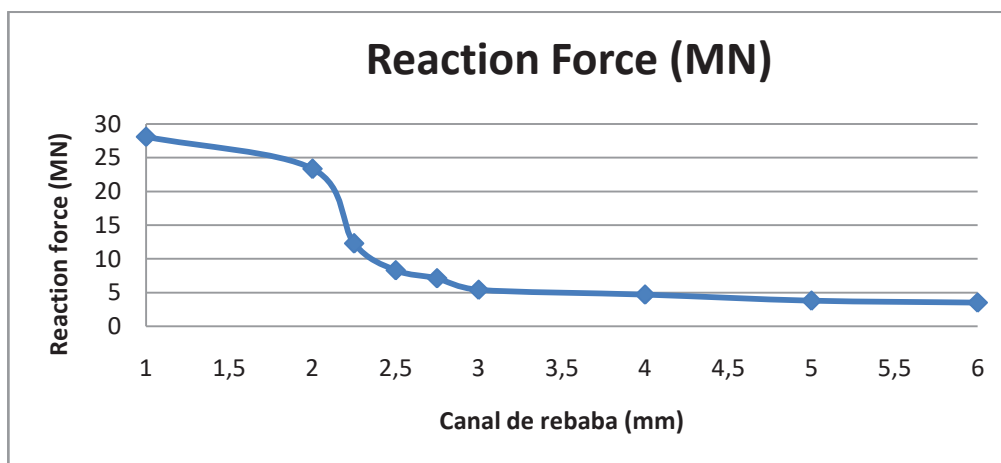


Fig. 12 Gráfica evolución de las fuerzas de reacción según espesor

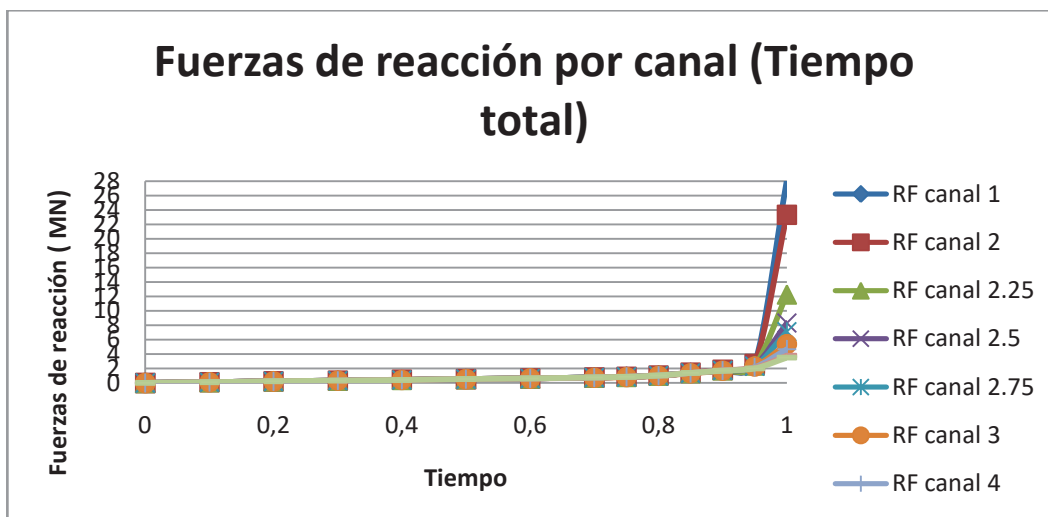


Fig. 16 Evolución a lo largo de la simulación de las fuerzas de reacción

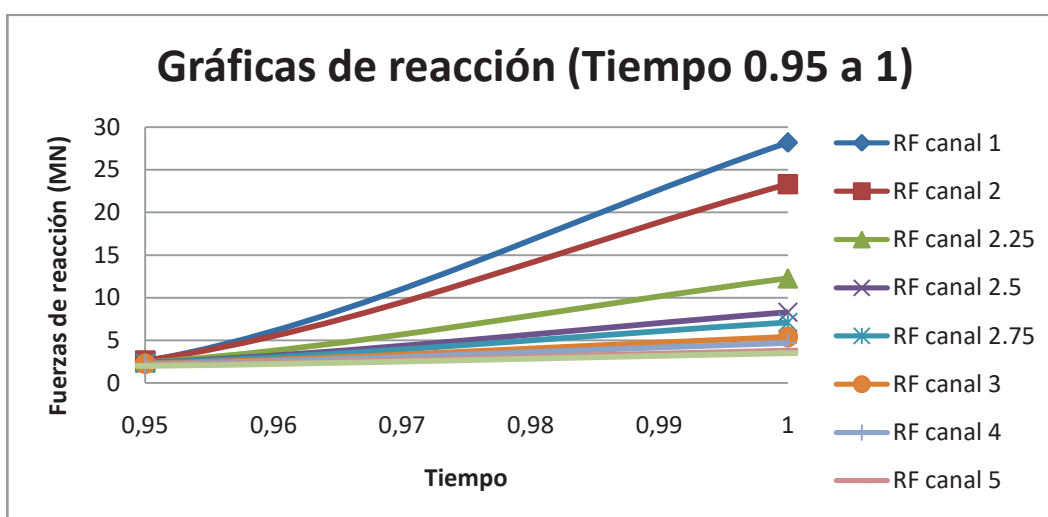


Fig. 17 Comparación fuerzas de reacción en función del tiempo (valores finales)

Como se puede observar en las gráficas anteriores y analizando junto a los valores numéricos mostrados anteriormente, se observa una reducción brusca para la dimensión de 2.25 mm en el espesor de rebaba, comprobándose que se recupera el descenso suave de fuerzas de reacción una vez superados los 3 mm de espesor.

3.1.3.4 Tensiones Von Mises

Con objetivo de analizar el comportamiento del material, a continuación se observará la distribución de tensiones Von-Mises en la pieza final de cada una de las simulaciones. Lo cual nos dará una visión de la energía de deformación empleada durante el proceso.

En las siguientes imágenes, se puede observar el diagrama de distribución de Tensiones Von Mises una vez deformada la pieza.

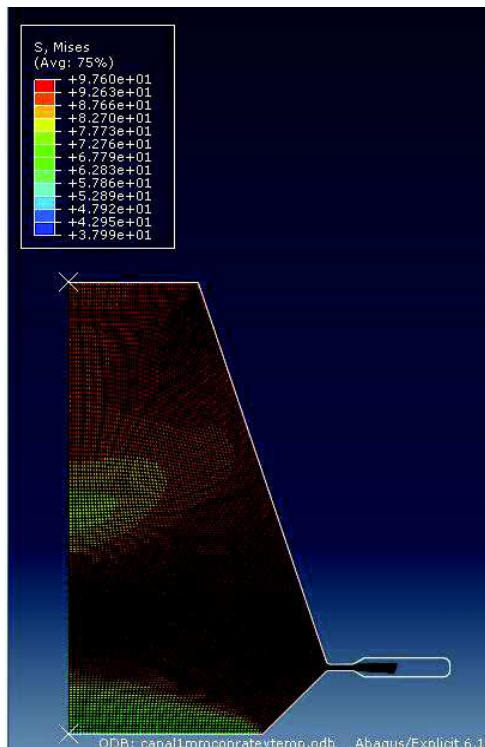


Fig. 18 Distribución tensiones Von Mises 1 mm

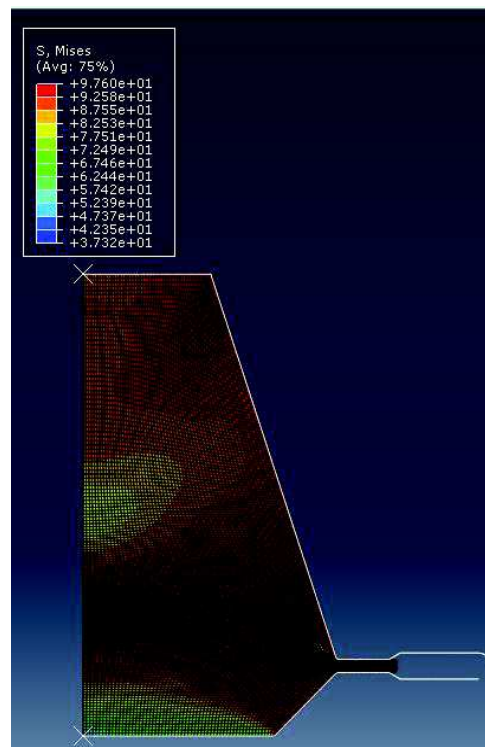


Fig. 19 Distribución tensiones Von Mises 2mm

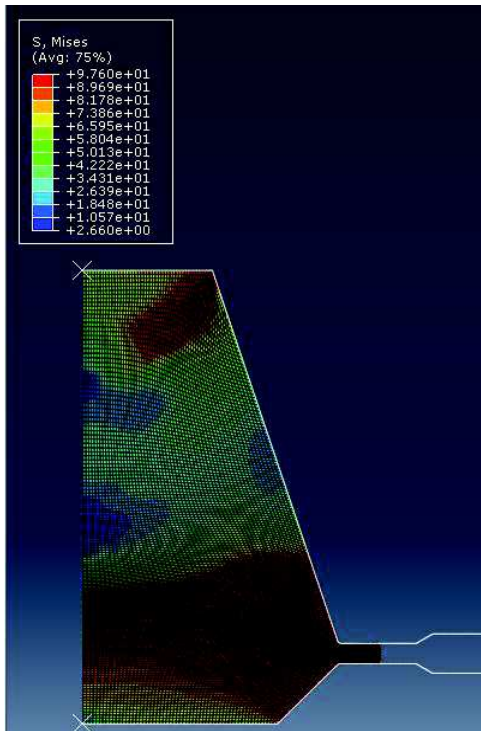


Fig. 20 Distribución tensiones Von Mises 3 mm

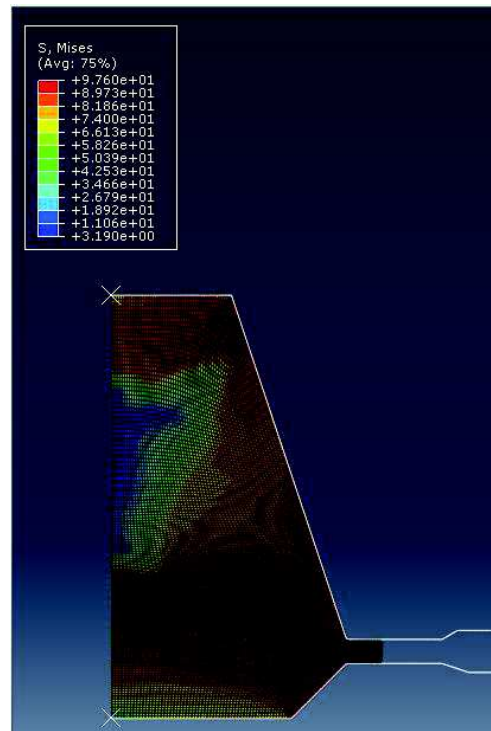


Fig. 21 Distribución tensiones Von Mises 4 mm

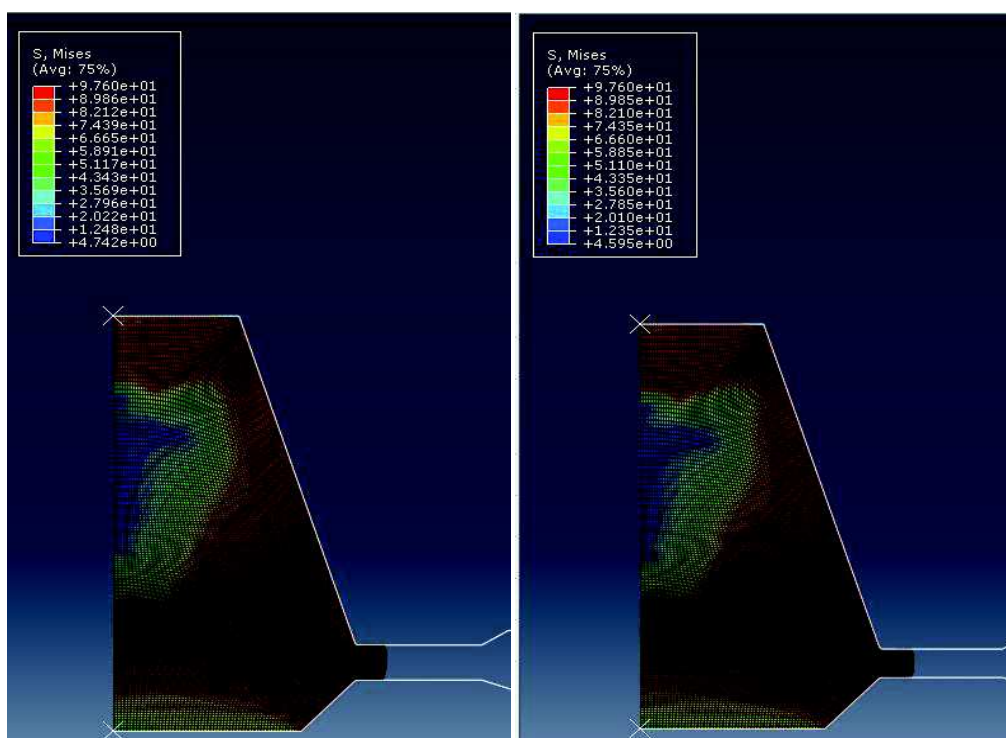


Fig. 22 Distribución tensiones Von Mises 5 mm

Fig. 23 Distribución tensiones Von Mises 6 mm

En ellas podemos observar cómo, a medida que aumenta el espesor del canal de rebaba, se incrementa el área donde las tensiones son menores. Podemos observar, que el punto de inflexión en el que aparecen por primera vez los valores más pequeños se da en el paso del espesor de 2 a 3 mm, de manera idéntica a como ocurría con las fuerzas de reacción. Por este motivo, al igual que se procedió anteriormente, se analizan valores intermedios entre 2 y 3 mm. Como muestran las siguientes imágenes:

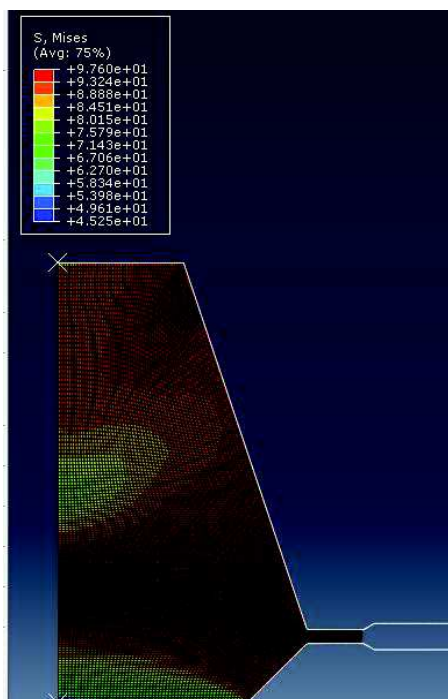


Fig. 24 Distribución tensiones Von Mises 2.25 mm

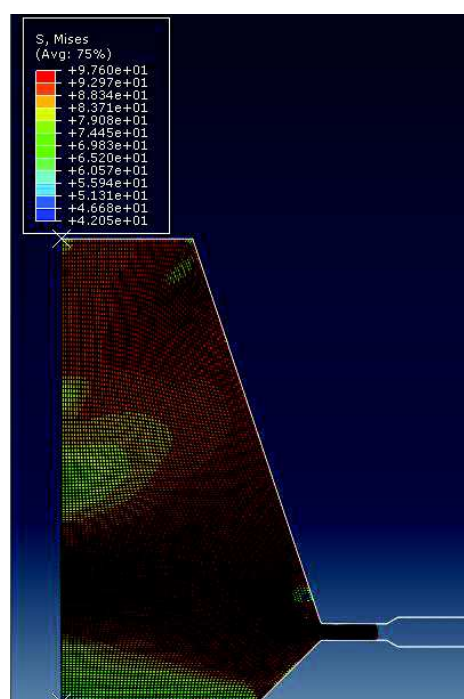


Fig. 25 Distribución tensiones Von Mises 2.5 mm

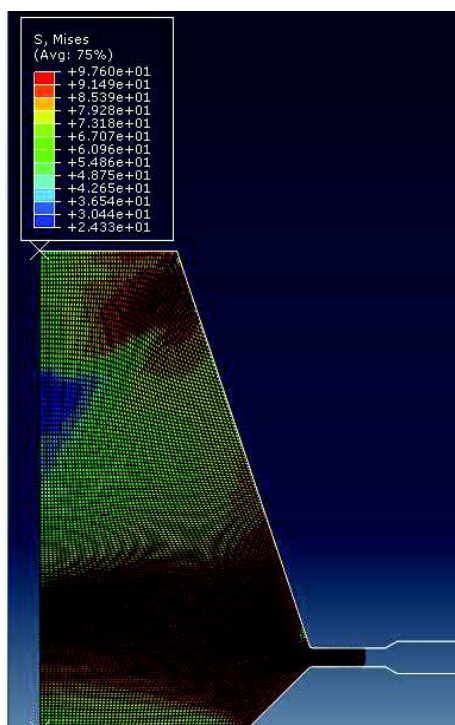


Fig. 26 Distribución tensiones Von Mises 2.75 mm

Como podemos ver en este segundo análisis, la aparición de los valores mínimos de tensión surgen en durante la simulación del canal con espesor 2.75mm.

3.1.4 Conclusiones

Realizadas las anteriores simulaciones y una vez analizados sus resultados, podemos establecer ciertas conclusiones.

Como se ha observado en el primer análisis de la fuerza de reacción registrada en cada uno de los casos estudiados, existe una reducción brusca de las mismas en el paso de espesor 2 a 3 mm, aproximadamente un 77% del valor. Al realizar simulaciones intermedias, se observa que la reducción importante de valor se origina en el espesor de 2.25 mm, un 50% aproximadamente de su valor en el espesor 2 mm.

Dicha reducción de fuerzas de reacción, podría dar a entender que el modelo simulado no es válido, pues cabría la posibilidad de no generar un campo de tensiones que lograra la deformación plástica del material. Lo que nos llevaría a afirmar que el límite para un correcto desarrollo de la simulación se encuentra en el espesor 2 mm.

No obstante, al proceder a analizar los campos de tensiones originados en cada una de las simulaciones observamos, como cabría esperar, la aparición de valores mínimos en el campo de distribución de tensiones al simular un espesor de canal de rebaba de 3mm. Pero al contrario que en el caso de las fuerzas de reacción, los tensiones no muestran una reducción y aparición de valores mínimos antes de emplear un espesor con un valor de 2.75 mm.

Por lo tanto, podemos afirmar que las tensiones originadas en las simulaciones pueden resultar válidas para la deformación hasta un espesor de rebaba de 2.5 mm, siendo válidos todos los inferiores al mismo. No obstante, convendría evitar un espesor mucho menor con el fin de reducir la fuerza solicitada a la estampa como es el caso de 1 mm.

3.2 ANÁLISIS 2: INFLUENCIA DEL CANAL DE REBABA EN EL CORRECTO LLENADO DE LA MATRIZ

En las siguientes simulaciones, se busca como objetivo determinar la influencia del espesor del canal de rebaba en el completo llenado de la estampa.

3.2.1 Definición del modelo computacional

Se emplearán las mismas características definidas en el caso de estudio 1, a diferencia de su geometría y dimensiones, a saber:

- Material empleado: SAE 1151, definido en el caso 1.
- Interacción de superficies: Acero con acero, empleando lubricación de grafito con un valor $\mu=0.15$.
- Mallado: serán empleados tanto los tipos como las dimensiones del caso uno, es decir:
 - I. Estampas: empleamos los elementos RAX2, que consisten en elementos lineales de 2 nodos rígidos y axisimetricos, con una dimensión de 0.5.
 - II. Tocho: elementos CAX4R, con una dimensión de 0.5mm y un control de distorsión 0.8.

3.2.1.1 Diseño de pieza y utillajes

En la presente simulación, siguiendo un modelo axisimétrico, se ha elegido una pieza más compleja comparada con el análisis 1. Con el objetivo de observar la influencia del canal de rebaba en el correcto llenado e la estampa. La pieza a estudiar poseerá una simetría en el eje x e y, de tal forma que únicamente se diseñará un cuarto de la pieza, es decir, el análisis se realizará con una única estampa y condición de simetría en su base.

- Estampa. Se define como un elemento rígido discreto axisimétrico. Seleccionando su punto de referencia (RP) en la zona más alejada de la rebaba, con el objetivo de aplicarle las condiciones de contorno correctamente.

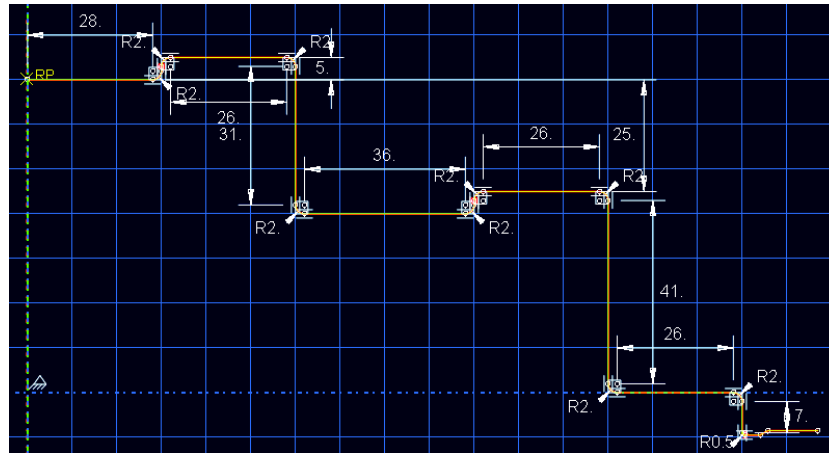


Fig. 27 Dimensiones estampa análisis 2

- Preforma. Se define como un elemento lámina deformable axisimétrica.

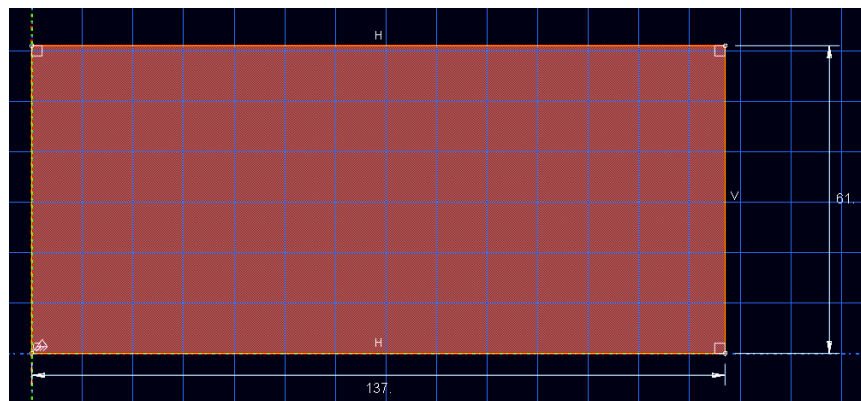


Fig. 28 dimensiones preformas análisis 2

3.2.1.2 Condiciones de contorno

- Estampa: de igual forma que en el anterior análisis, sus condiciones de contorno son definidas en su Punto de Referencia. Posee las mismas condiciones de contorno que en el caso anterior, a excepción de la dimensión de su desplazamiento. Libertad de movimiento en eje Y, condición de XSYMM ($U1=UR2=UR3=0$), añadiendo su desplazamiento en el eje Y.
- Preforma: En este análisis, al contrario que en el anterior, no poseemos estampa inferior. Por lo tanto se debe definir condiciones de contorno en su base. Es

necesario que tenga libertad de movimiento en el eje de las X, por lo tanto se aplica en su base una condición YSYMM ($U_2=U_{R1}=U_{R3}=0$).

3.2.2 Definición variables de cálculo.

En este segundo modelo, se procede a realizar la simulación con las mismas condiciones que en el apartado anterior, es decir:

- Step “dynamic, explicit”, en el cual se indicará el movimiento de la estampa que generará los esfuerzos de deformación.
- Una amplitud tabular, la cual nos indica, como se ha explicado antes, el movimiento continuo de la estampa, es definida de manera idéntica al análisis 1.

3.2.3 Resultados.

En el presente apartado se procede a analizar los resultados obtenidos por las simulaciones, cuyo objetivo es la búsqueda de defectos de llenado en la estampa.

3.2.3.1 Llenado de estampas.

A continuación podemos analizar cada una de las simulaciones realizadas en este segundo análisis para los casos de espesor de canal de rebaba de 1 a 4 mm. Es posible observar en una visión general como a mayor espesor del canal el llenado completo de la estampa es más pobre y presenta dificultades hasta el punto de no lograr realizar un llenado completo.

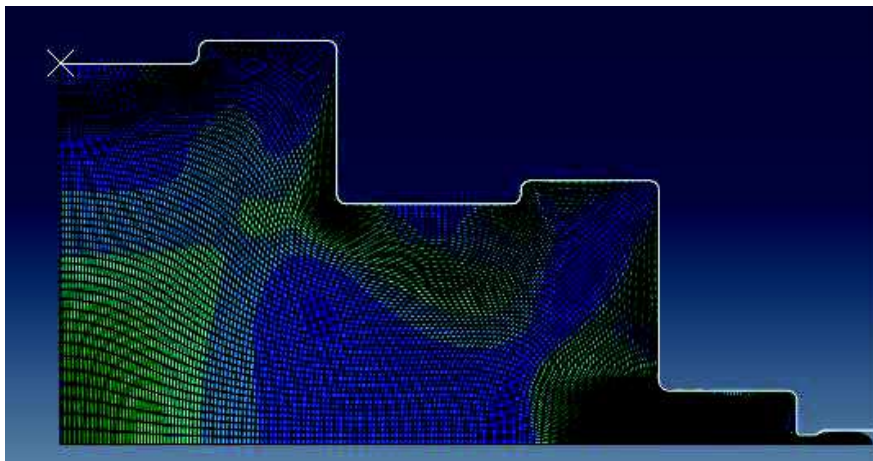


Fig. 29 Llenado estampa con espesor 1 mm

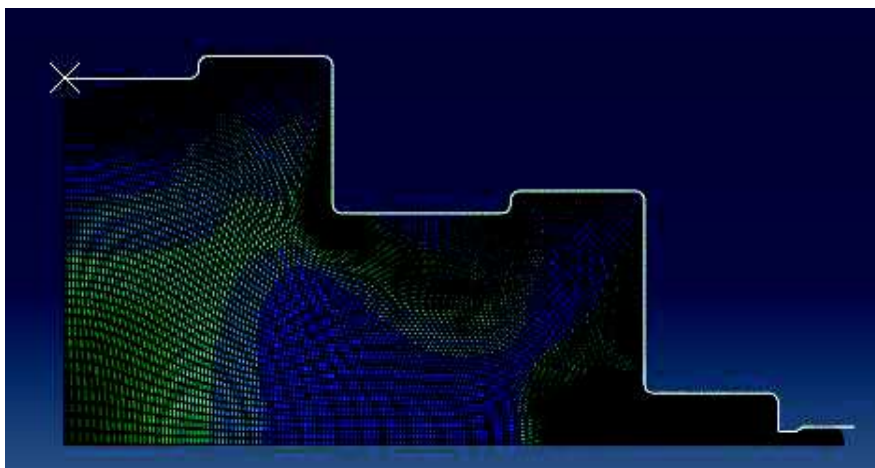


Fig. 30 Llenado estampa con espesor 2 mm

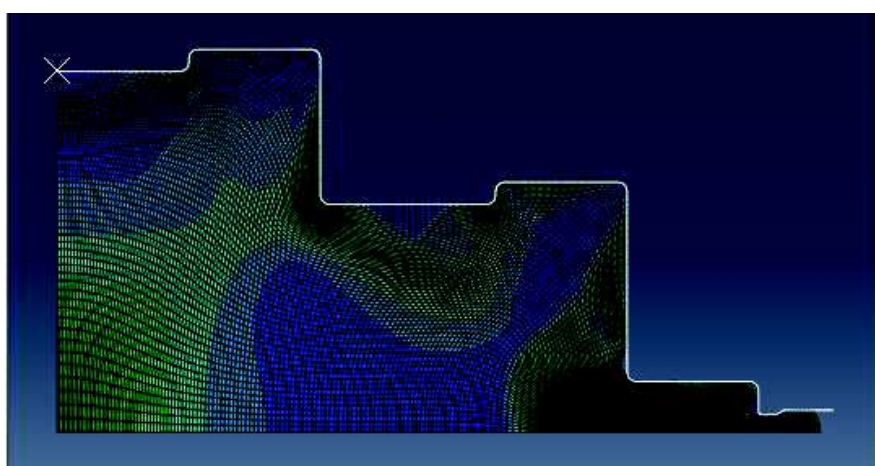


Fig. 31 Llenado estampa con espesor 3 mm

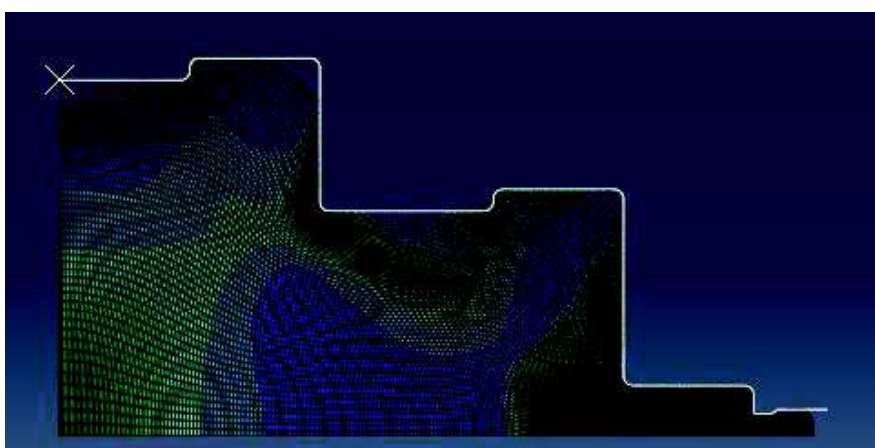


Fig. 32 Llenado estampa con espesor 4 mm

Observamos en la anterior serie de imágenes, como a medida que aumenta el espesor el material no logra llenar la matriz completamente, presentando las primeras imperfecciones por falta de llenado al dimensionar el canal de rebaba en 3 mm.

A continuación podemos observar en detalle las zonas críticas para el llenado para cada una de las simulaciones:

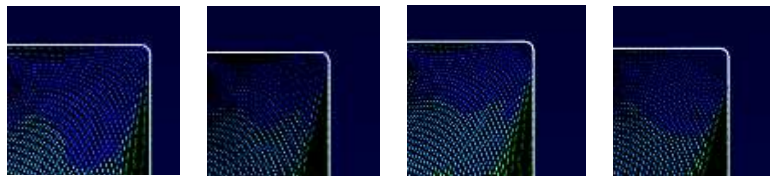


Fig. 33 Detalle faltas de llenado (de derecha a izquierda 1, 2,3 y 4mm de espesor)



Fig. 34 Detalle segunda zona de falta de llenado para el canal de espesor 4mm

Una vez analizados los resultados, se comprueba la relación entre el canal de rebaba y su falta de llenado en la estampa. Debido a estas imperfecciones es necesario sobredimensionar la preforma teniendo que lidiar con los cargos añadidos al proceso de fabricación que ello conlleva.

En el caso que nos ocupa, el incremento de material para la correcta fabricación con los espesores de canal de rebaba de 3 y 4 mm consta de un porcentaje relativamente bajo, siendo 2 y 4 % respectivamente del volumen de material inicial. No obstante es un porcentaje considerable en presencia de producciones largas.

3.2.3 Conclusiones.

Analizando los resultados de las presentes simulaciones, podemos concluir la problemática de seleccionar un adecuado espesor de canal de rebaba y su influencia en la validez de la pieza.

Como se ha observado un espesor excesivo en el canal de rebaba supone la pérdida innecesaria de material por el mismo. Debido a que el momento en el que el material alcanza la cavidad del canal, encuentra una trayectoria la cual presenta menos restricciones para su flujo.

En vista de los resultados, habiendo realizado las simulaciones con la misma cantidad de material en la preforma y condiciones idénticas en la simulación. Nos es posible afirmar el hecho de que un canal superior a 2 mm de espesor, nos aportará defectos de llenado de la estampa en las zonas más alejadas del canal siempre y cuando no se aporte un sobredimensionamiento de la preforma.

En el presente análisis se ha determinado que para un correcto llenado en espesores superiores a 2 mm, es necesario un sobredimensionamiento del 2% para un espesor de 3 mm y un sobredimensionamiento del 4% trabajando con un espesor de 4 mm.

4 CONCLUSIONES

A continuación en este último apartado se procede a concluir la determinación de un espesor adecuado para el canal de rebaba, comparando ambos análisis realizados anteriormente.

En presencia de los resultados obtenidos, en una primera visión podemos concluir que un espesor de canal de rebaba superior a 2 mm, puede resultar una opción poco adecuada en el caso de no sobredimensionar la pieza a la hora de evitar defectología como la falta de llenado de una estampa.

Por otro lado, analizando las fuerzas de reacción y los campos de distribución obtenidos de las tensiones Von Mises, podemos dar por válido, en vista de los resultados, un espesor de hasta 2.5 mm del canal, puesto que la presencia de zonas con tensiones mínimas no se presenta hasta el espesor de 2.75 mm. Esta área localizada en la zona central de la pieza, podría ocasionar una pieza final defectuosa por una falta de deformación en la preforma. Por lo tanto nos lleva a descartar espesores superiores a 2.75 mm.

Por último, si analizamos la evolución de la gráfica de las fuerzas de reacción, las cuales pueden traducirse como la fuerza solicitada por la matriz, observamos que la diferencia entre la solicitada en un espesor de 2.5 mm y otro de 2.75 es irrisoria, siendo únicamente un 14% (téngase en cuenta que al tratarse de valores de fuerza considerablemente más pequeños que en espesores inferiores, la diferencia es mínima). Mientras que la diferencia de fuerzas de reacción entre 2.25 y 2.5 mm de espesor consta del 32%, valor que nos aleja más de la fuerza solicitada que produce los campos de tensión más débiles.

Para concluir, comparando resultados de ambas simulaciones, teniendo presente el hecho de ser un estudio teórico y creyendo conveniente realizar ensayos destructivos reales. Seleccionamos como más adecuado el espesor de canal de rebaba con una dimensión de 2.25 mm, proporcionándonos un ahorro en la fuerza aplicada por las estampas del 56.3% en comparación a 1mm y del 47% frente a 2mm, con un campo de

distribución de tensiones sin presencia de zonas de tensiones pobres y un correcto llenado en zonas complejas de la estampa.

ANEXO I. PROCESO DE CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA. FORJA

El presente anexo consta de un análisis de los documentos presentados en la bibliografía [4] y [7].

1 INTRODUCCION Y CLASIFICACION DE LA FORJA

En un proceso de conformado por deformación plástica, la fluencia del material dentro de la zona deformada es producida por la aplicación de fuerzas externas, provocando en la mayoría de los casos la compresión del material. Durante este proceso, la estructura del grano se altera, se refina y se orienta, mejorando de esta forma las propiedades mecánicas del material.

La forja es uno de los procesos de conformación mediante deformación plástica más empleados en la industria. En ella las deformaciones del material se originan mediante dos utillajes, denominados matrices o estampas, una superior unida a la maza y otra inferior unida a la base de la máquina. La forma de estos utillajes nos proporciona una primera clasificación de la forja:

- Forja libre: los utillajes son completamente planos, de tal forma que al general un esfuerzo de compresión se produce un abarilamiento de la pieza, es decir una disminución de la dimensión en un eje a raíz del aumento en los otros dos.
- Forja en estampa: por otro lado los utillajes pueden llevar grabados en bajorrelieve la semiforma de la pieza, de manera que una vez realizado el esfuerzo de compresión entre ambas, dieran por resultado la pieza final. Cabe destacar que en este último caso existe una segunda clasificación dependiendo de la zona de escape del material sobrante:
 - I. Forja en matriz cerrada o de precisión: se trata de un proceso en el que no existe excedente de material, en este caso se presiona el mismo mediante un embolo, haciendo que rellene la cavidad. En este proceso la cantidad de material es crítica, ya que siendo inferior se produciría una

pieza incompleta y a su vez si es superior podría darse un excedente quedando sobredimensionada o por el contrario si se sigue ejerciendo presión podría romper el troquel.

- II. Forja con rebaba: por último en este proceso se permite una salida del material sobrante mediante un hueco entre ambas estampas, denominándose “zona de rebaba” y al material alojado en el hueco “rebaba”. Como consecuencia la cantidad de material no es tan crítica, pudiendo existir un excedente, no obstante surge el inconveniente al existir el mismo, provocando la necesidad de realizar una operación de mecanizado, denominado rebarbado, para eliminar el excedente de material.

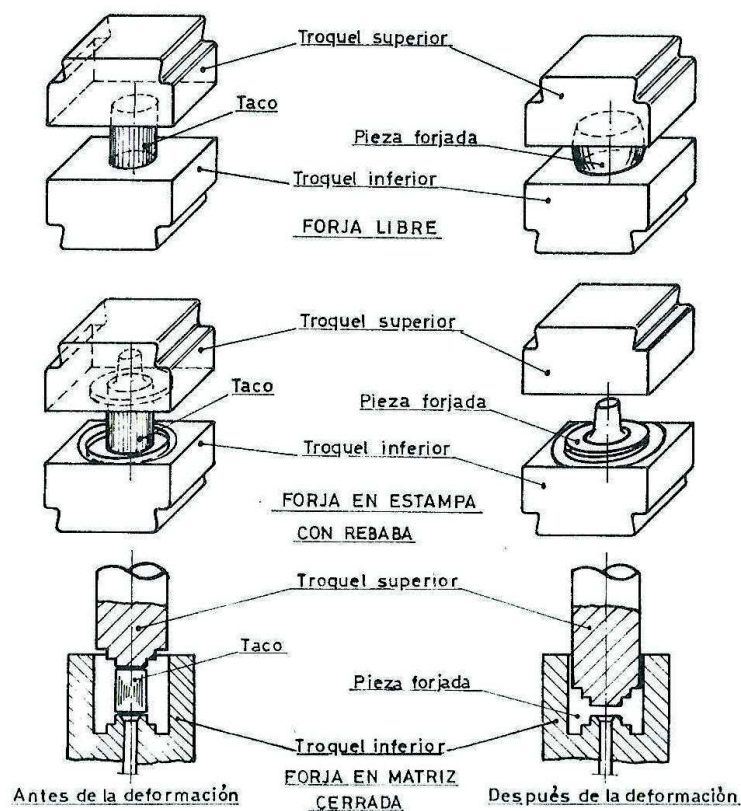


Fig. 35 Métodos de forja [3]

En el estudio que nos ocupa, nos centramos en la forja cerrada en caliente, en esta modalidad de forja cabe destacar la existencia de cuatro operaciones distintas dependiendo de su aproximación a la forma final, por lo tanto se clasifica en:

- Forjas burdas: este tipo es la forma más básica de forja, empleándose para dar una primera forma a la pieza, quedando muy lejos de la forma final. Generalmente se producen con grandes cantidades de sobrematerial para futuras operaciones de mecanizado.
- Forjas terminadas: son prácticamente iguales que las forjas burdas, pero con una mayor aproximación a la forma final, teniendo un menor excedente de material a mecanizar.
- Forjas casi netas: un nivel más avanzado de la forja terminada, se forjan lo más cerca posible de la forma final de la pieza, de manera que precisen poco mecanizado posterior.
- Forja neta: también llamadas forjas de precisión, se forjan en uno o varios lados la forma neta de la pieza final, de tal manera que se elimina como mínimo en uno de los lados las operaciones de mecanizado.

2 TIPOLOGIA DE PRENSAS

En el conformado por deformación plástica en forja, existen diversas maquinarias usadas en la industria. En este apartado se procederá a describir brevemente el funcionamiento de cada una.

Se puede realizar una primera clasificación en dos grandes grupos, prensas y martillos. Su principal diferencia radica en que durante el proceso de forja por martillo se golpea rápidamente la superficie del material a conformar con una maza, provocando una deformación rápida lo que provoca una pieza final en la que los granos están ordenados

en la configuración inicial, mientras que en la forja por prensa el material se introduce en una cámara, la cual lo someterá a una fuerza de compresión más controlada, permitiendo que la deformación sea sustancialmente más lenta permitiendo al material adaptarse a su nueva configuración de una forma más ordenada.

2.1 Prensas

Podemos distinguir una segunda clasificación dentro de esta tipo de forja, atendiendo al método de accionamiento de cada máquina:

- Prensa de husillo: están basadas en el principio tornillo-tuerca, pudiendo existir en esta dos tipos distintos de accionamiento. Por un lado si la tuerca permanece fija, al girar el tornillo será este quien suba y baje ejerciendo la fuerza de deformación. Si por el contrario el tornillo gira pero permanece fijo en el espacio, será la tuerca quien realice la fuerza de deformación, moviéndose a través de las deslizaderas.
- Prensa mecánica: basadas en el principio cigüeñal-biela. La biela está unida a la maza, de manera que al girar el cigüeñal, realiza el movimiento completo de subida y bajada de la prensa mediante una vuelta completa del mismo.
- Prensa de cuña: funcionan mediante el mismo principio que las prensas mecánicas, con el aditivo de intercalar entre el bastidor de la máquina y la maza, una cuña horizontal, otorgando una unión directa y rígida sobre una gran superficie y disminuyendo la deformación elástica del conjunto.
- Prensas de rodillos: al igual que las prensas mecánicas, basa su funcionamiento en el principio cigüeñal-biela. Disponiendo de un mecanismo de rótulas compuesto por una rótula superior fija y una inferior unida a la maza inferior. De esta forma el dispositivo cigüeñal-biela realiza un movimiento horizontal en la rótula intermedia, provocando el movimiento vertical.
- Prensas hidráulicas: basan su funcionamiento en un dispositivo de cilindro-pistón, donde el pistón esta unido directamente, o a través de una transmisión, a

la maza. Estas prensas dan mayor capacidad de deformación en igualdad de esfuerzo máximo.

2.2 Martillos

Dependiendo de su modo de accionamiento podemos encontrar:

- Martillos de caída libre: se trata de un funcionamiento simple, consiste en elevar la maza hasta una determinada altura dejándola caer. Hace uso de la energía potencial gravitatoria acumulada, transformándola en energía cinética durante la caída. Con el objetivo de amortiguar el golpe contra el suelo se disponen de las denominadas “chabotas”, mucho más pesadas que la maza, las cuales hacen la función de mesa.
- Martillos de doble efecto: al igual que en los martillos de caída libre, elevan la masa a una determinada altura, pero en esta ocasión durante su caída, el martillo es ayudado por un impulso superior producido por un sistema cilindro-pistón accionado por aire o vapor de agua. Generándose energías de impacto y velocidades mayores que en caída libre.
- Martillos de contragolpe: de manera similar a los martillos de doble efecto, se emplea el impulso superior de apoyo a la caída libre de la masa, ayudado a si mismo mediante un movimiento ascendente de la mesa, generándose la deformación en el impacto producido por el encuentro en el recorrido de ambas partes. Consiguiéndose de tal manera mayores energías y se reduce la masa de las chabotas.

3 COMPORTAMIENTO ENERGETICO

3.1 Martillos

En el proceso de forja mediante martillos, es de real importancia el conocimiento de la energía útil de cada golpe (E_u), entendida como la energía transmitida para la deformación del material.

$$E_u = \frac{1}{2} \frac{MM_1}{M+M_1} v_v^2 (1 - K^2) \quad [3]$$

Siendo:

- M , masa de la maza.
- M_1 , masa de la chabota.
- H , altura de la caída.
- V , velocidad de la masa
- K , es un número característico del golpe. K varía desde 0.8 a 0.3 dependiendo de la rigidez del material, entendiéndose que disminuye con la temperatura y de esta forma, teniendo relación la energía útil con la temperatura del proceso.

3.2 Prensas

Durante el proceso de forja en las prensas pierde importancia la energía disponible, siendo útil el conocimiento de la fuerza en cada momento del proceso.

Otro parámetro de interés sería la velocidad de la maza. En las prensas la velocidad no siempre alcanza 1 m/s , pero con una presión adecuada se ofrece al material la

posibilidad de deformarse plásticamente a baja velocidad, permitiendo a las partículas de la masa deslizarse regularmente y estableciéndose en la nueva posición adoptada.

En una prensa hidráulica de esfuerzo cortante y velocidad lenta, el gráfico $F=f(x)$ resulta una línea recta. La velocidad vertical puede describirse de la siguiente forma:

$$v_v = v_t \sin \theta \left[\frac{\cos \theta}{\sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 - \sin^2 \theta}} + 1 \right] [3]$$

4 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE FORJA

La forja se trata de un proceso de deformación plástica en la que se debe realizar un esfuerzo suficiente que permita sobrepasar el límite de fluencia del material y se produzca el flujo de material conformando el producto final, evitando posibles defectos que puedan dar como resultado una pieza final no apta. No obstante, debe ser estudiada con detenimiento la relación existente entre el esfuerzo realizado y la temperatura de trabajo, así como los posibles problemas que pueda ocasionar la misma.

El límite de fluencia disminuye conforme aumenta la temperatura, por ello esta variable es un factor importante a tener en cuenta a la hora de realizar una estampación. A la hora de elegir la temperatura a la que se realizara el proceso de forjado, se debe tener en cuenta la deformabilidad del material. Dependiendo de este factor la temperatura del proceso variará, en un material con gran deformabilidad la forja podría realizarse a temperatura ambiente, denominándose de esta manera “forja en frío”. En otros materiales sería suficiente un calentamiento a bajas temperaturas, asegurando así la ausencia de modificaciones en su microestructura, “forja a media temperatura”. En los materiales que poseen una deformabilidad muy baja es imprescindible elevarlos a altas temperaturas para poder conseguir la forma final, de lo contrario se podrían generar defectos como grietas o el fallo del material, en este caso se denomina “forja en caliente”.

A pesar de que cualquier material podría ser deformado en cualquier temperatura, en caso de lograr los esfuerzos necesarios para superar su límite de fluencia, no obstante durante la deformación el material sufre cambios internos, lo que podría producir agrietamientos o malformaciones provocadas por una deformación a una temperatura incorrecta, por lo tanto esto nos indica que existe un límite en los esfuerzos para producir una pieza final válida.

Existe también la problemática con el aumento de la temperatura, pues esta misma produce cambios en la estructura interna del material, pudiendo variar sus propiedades mecánicas y dando por resultado una pieza fina inservible. Por otro lado en mayor o menor grado, podría provocar una reacción química entre el material y algún elemento externo, pudiendo generar problemas de oxidación, o formación de “cascarilla” y de reducción de carbono.

También se ha de tener en cuenta que una consecuencia de la deformación en caliente se produce en el momento del enfriamiento. Cuando el material ha sido deformado por las estampas y comienza a enfriarse, tiene lugar lo que se denomina como contracción, es decir la pieza al enfriarse reduce su volumen. Este hecho podría dar por resultado una pieza inválida puesto que las dimensiones no serán las definidas. Por ello se debe sobredimensionar el troquel en función de los coeficientes de dilatación de los materiales.

Material	Coefficiente dilatación lineal (α) $\times 10^{-6}$
Acero	11
Aluminio	23.8
Bronce	17.5
Cobre	16.5
Latón	18.5
Oro	14.2
Plata	19.7

Tabla. 1. Coeficiente de dilatación de varios materiales [3]

Toda esta problemática obliga a realizar ensayos para poder calificar a los materiales según su comportamiento a sufrir una deformación:

- Ensayo de compresión axial simétrica.
- Ensayo de torsión.
- Ensayo de dureza.

5 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA DEFORMACION

Una propiedad importante que debe ser estudiada, es el conocimiento de que la velocidad de aplastamiento influye de manera elevada en la resistencia a la deformación del material.

Esta característica se debe a diversos factores, entre ellos se ha observado que para las mismas probetas, en idénticas condiciones, los resultados han sido notablemente distintos. En el caso de las probetas ensayadas mediante prensas de martillo, se pudo observar un mayor volumen, sufriendo a su vez un menor abarilamiento debido a su alta velocidad de deformación.

Realizando un examen micrográfico se puede observar que los granos de las probetas ensayadas mediante la prensa de martillo están más compactos, lo que indica una mayor densidad y como consecuencia una mayor resistencia a la deformación.

A raíz de la velocidad, se puede entender un menor enfriamiento por parte de las probetas ensayadas en las prensas de martillo, debido a un menor contacto con el mazo, esto favorece la rápida propagación de todas las moléculas, resultando una deformación más uniforme.

Hay que tener en cuenta que la gran diferencia de masa entre el material y el mazo, puede superar sus límites de resistencia, produciendo un agrietamiento en la capa exterior del material. Debido a este efecto, se debe realizar diversos golpes proporcionales con el martillo de forma que el material pueda absorberlos.

Por otro lado en la prensa hidráulica las moléculas tienen mayor tiempo para de nivelarse sin dar lugar a una rotura del material, esto es debido a una menor velocidad de deformación, permitiendo asimismo absorber el aplastamiento de una sola vez.

En la siguiente imagen podemos comparar la resistencia a la deformación de tres aceros en función de su temperatura, y de su ensayo en prensa de martillo o prensa hidráulica. Podemos observar como a una mayor velocidad de aplastamiento, la resistencia a la deformación es superior comparada con una velocidad menor.

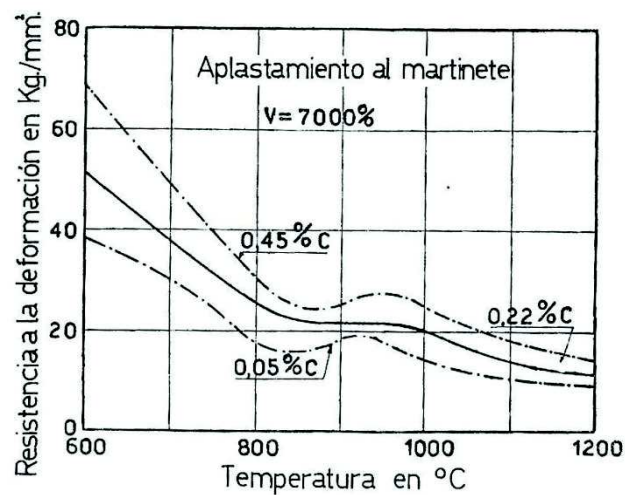


Fig. 36 Curvas esfuerzo-temperatura a velocidad alta para diferentes porcentajes de carbono [6]

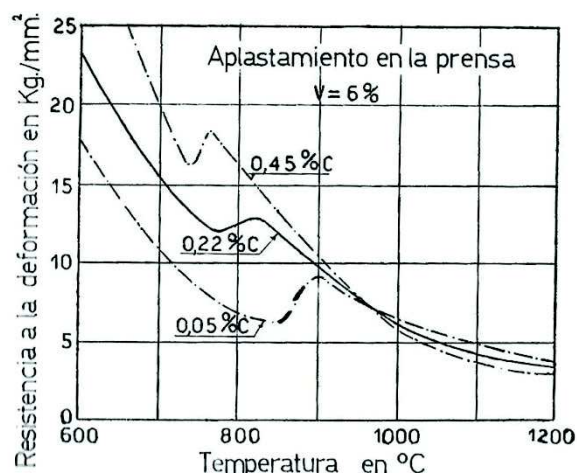


Fig. 37 Curvas esfuerzo-temperatura a velocidad baja para diferentes porcentajes de carbono [6]

En nuestro caso de estudio, en el que la deformación se produce en una matriz cerrada, surge una complicación adicional, el libre movimiento del material esta canalizado de diferente forma a su trayectoria natural logarítmica de deformación. Por ello es de elevada importancia el correcto diseño de la matriz, de lo contrario podrían producirse pliegues, grietas o malformaciones, este efecto se produce en menor medida a bajas velocidades, debido, como se ha comentado anteriormente, a la mayor capacidad de los granos para acoplarse como consecuencia del tiempo.

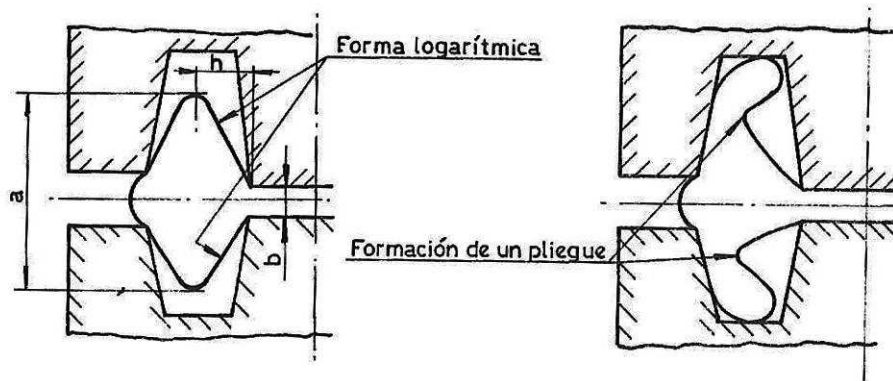


Fig. 38 Formación de pliegues [3]

6 SECUENCIA DE OPERACIONES DE FORJA

Durante la fabricación de una pieza forjada, normalmente se emplea una secuencia de varias fases hasta llegar a la forma final, podemos enumerar las siguientes fases, dependiendo de su operación:

- Aplastadoras.
- Estiradoras.
- Rodadoras.
- Dobladoras.
- Laminadoras.
- Iniciadoras.
- Preparadoras.
- Acabadoras.

Tras la última fase es necesaria una operación de mecanizado para realizar un rebabado, es decir eliminar la rebaba y soltarla de la pieza final, así como en algunos casos operaciones suplementarias como punzonados.

7 INFLUENCIA DEL ROZAMIENTO EN EL LLENADO DE LA MATRIZ

En el proceso de deformación plástica mediante forja, el material se encuentra ante el llenado de una cavidad que debe quedar completa, el problema se complica en el momento que el material hace contacto con las paredes de la misma, produciéndose un

frenado del material, lo cual obliga a aumentar la presión de deformación para vencer la adherencia del material.

Para entender el fenómeno del rozamiento debemos empezar por su forma más básica, es decir el “rozamiento sólido”. Dicho rozamiento se da al someter un cuerpo sólido indeformable a la acción de una fuerza obligándolo a deslizarse por una superficie. En este caso tenemos dos situaciones:

- Si la fuerza aplicada es menor que el producto $\mu_e \cdot N$, el cuerpo permanecerá inmóvil.
- En cambio si la fuerza es exactamente igual a dicho producto, el cuerpo iniciará un movimiento, manteniéndose aun disminuyendo F hasta el valor límite $\mu_d \cdot N$.

Siendo:

- N , fuerza perpendicular a la superficie de rozamiento.
- μ_e , coeficiente de rozamiento estático.
- μ_d , coeficiente de rozamiento dinámico.

Por lo tanto la fuerza de “rozamiento seco” que habría que vencer para iniciar un movimiento sería:

$$F_R = \mu N$$

En este caso, los valores del coeficiente de rozamiento (μ) son independientes tanto de la dimensión de la superficie en contacto como de la fuerza normal que soporta el material, dependiendo únicamente de la naturaleza de los materiales en contacto y del estado superficial.

Como es sabido, el rozamiento surge como consecuencia del engrane formado entre las crestas y los valles formados por la rugosidad de las superficies en contacto, existiendo diversos factores que pueden variar su valor.

Normalmente se emplean lubricantes para disminuir el rozamiento entre ambas superficies, en la siguiente tabla podemos observar los coeficientes más usuales.

Materiales en contacto	Lubricante	μ
Acero con acero	Grafito	0.15
Bronce con acero	Aceite	0.07
Fundición gris con acero	Seco	0.3

Tabla 2. Valores usuales de los coeficientes de rozamiento. [3]

La temperatura juega un papel importante en los coeficientes de rozamiento variando su valor, por lo general a medida que aumenta la temperatura aumenta el valor del coeficiente de rozamiento. Tomando como ejemplo un rozamiento acero contra acero, lubricado con grafito coloidal disuelto en agua, el valor de dicho coeficiente varía de la siguiente forma:

- Temperatura $\leq 900^{\circ}\text{C}$, $\mu=0.15$
- Temperatura = 1000°C , $\mu=0.16$
- Temperatura = 1100°C , $\mu=0.17$

En el caso que nos ocupa, el cuerpo sometido a presión sufre una deformación plástica produciendo un fenómeno adicional de adherencia. Debido a este efecto se pierde la igualdad de la ecuación del rozamiento, encontrándonos ante el “rozamiento viscoplástico”.

En vista a la nueva situación de rozamiento, el valor de μ debe ser corregido, por un lado el valor del coeficiente de rozamiento ya no aumenta junto a la temperatura, sino que disminuye, por otro lado, al contrario que en el “rozamiento seco”, la extensión de las superficies en contacto afectan al valor de la fuerza de rozamiento.

A continuación se analiza un caso de rozamiento viscoplástico mediante un estudio teórico-experimental, entendiendo mejor este fenómeno. En la siguiente imagen observamos una barra cuadrada de lado “c”, sujeta por los cuatro lados con una fuerza “T” y por lo tanto sufre unas presiones “P” y una fuerza de empuje “F”.

$$P = \frac{T}{Lc}$$

$$F = p_R c^2$$

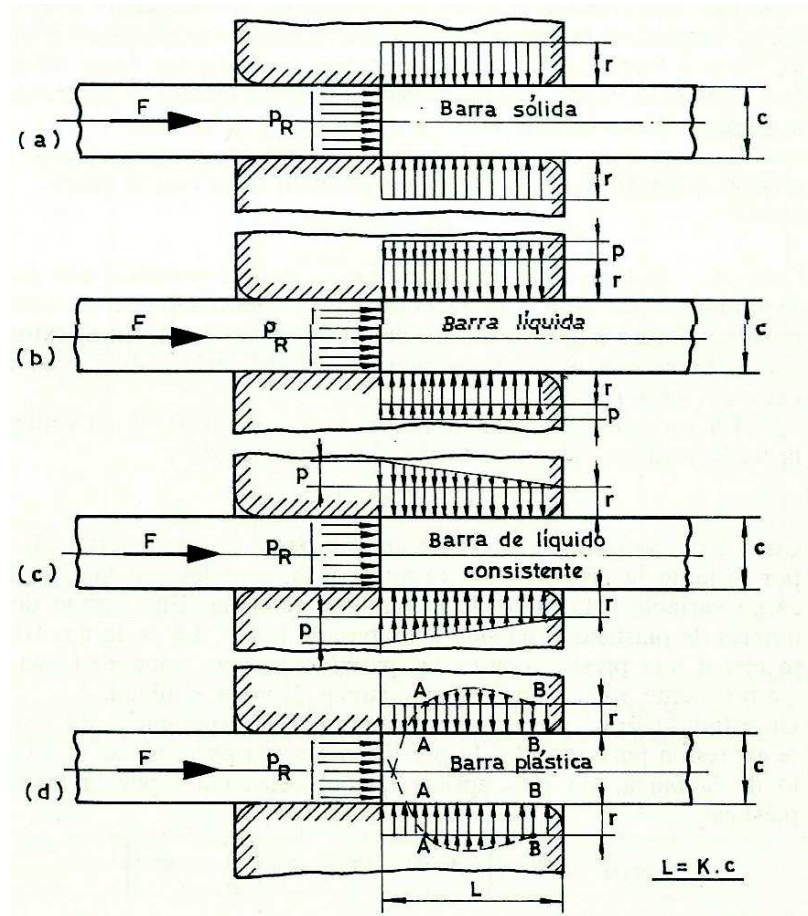


Fig. 39 Rozamiento viscoplastico [3]

Al tratarse de una barra sometida a deformación plástica, la presión se transmite a las paredes, produciendo una pérdida de carga variable a lo largo de la superficie retenida. En dicha zona, donde se sobrepasa el umbral de plasticidad, se ejerce una presión sobre las paredes la cual recibe una respuesta que habrá que sumar al valor “r” inicial.

Teóricamente se puede llegar a la siguiente expresión para calcular la presión necesaria para iniciar el movimiento, únicamente contando la resistencia de la transmisión plástica.

$$p_{R(d)} = Sn[e^{4\mu k'} - 1 + 4\mu \left(\frac{K}{n} - K'\right)] \quad [3]$$

Siendo:

$$K' = K - \frac{a_{\min}}{4\mu S} - 0.2 \quad [3]$$

Siendo los valores n , a_{\min} y S característicos de cada material y cada temperatura.

- S corresponde a los umbrales de plasticidad correspondientes a los valores $\frac{c}{L}$ de la barra.
- A_{\min} es el valor de la 3ª zona de los umbrales de plasticidad, el cual corresponde con el mínimo valor de “a” a la temperatura en que se encuentre.
- N es el mismo para el material, tiene en cuenta la extensión de la superficie en contacto.

ANEXO II. DISEÑO DE FORJA CERRADA CON REBABA

El presente anexo es resultado del análisis de los documentos de la bibliografía [2], [3], [5] y [7].

1 DISEÑO DE ESTAMPAS

El correcto diseño de las estampas es primordial, puede ser la diferencia entre una pieza final válida o con defectos que la hagan inservible. Un diseño adecuado da la posibilidad de alinear la orientación de los granos en la dirección de los esfuerzos principales que ocurrirán cuando la pieza este en funcionamiento.

Por ello es necesario realizar un estudio y diseño de la pieza a estampar, teniendo en cuenta la pieza finalizada en la prensa, es decir estudiando su excedente de material, de esta manera resultará más sencillo poder definir la geometría de la estampa.

El principal objetivo del correcto diseño consiste en la disminución de la resistencia a la deformación. Por ello no debe aparecer ningún canto vivo, cambios abruptos, patines extremadamente delgados, etc y de esta forma eliminar también la posibilidad de grietas y pliegues en la pieza final.

Por otro lado se debe considerar ciertas tolerancias a la hora de diseñar la pieza final, con el objetivo de poder salvar posibles imperfecciones, consideremos por ejemplo que se produce una excentricidad en una de las estampas, de esta manera la pieza resultaría defectuosa. Por el contrario mediante la existencia de una tolerancia y tras un proceso de mecanizado, esa excentricidad podría darse por válida.

De la misma forma esta tolerancias tienen en cuenta la contracción del material, es decir en el momento que el material comienza a enfriarse disminuyen sus dimensiones, pudiendo dar por resultado una pieza con dimensiones insuficientes si no se ha tenido en cuenta esta contracción. En el anexo I, se ha definido con más detalle.

Las estampas están diseñadas con cierto ángulo de inclinación, denominado “ángulo de salida”, el cual permite que la pieza pueda ser extraída con facilidad. Por otro lado, esta inclinación ayuda al flujo de material en el completo llenado de la matriz.

A la hora de definir los ángulos suele resultar práctico mantener iguales los ángulos interiores y exteriores, con el fin de reducir la complejidad del mecanizado de la estampa. No obstante los ángulos de salida, pueden considerarse entre los siguientes intervalos:

- Interiores: 5° a 7°
- Exteriores: 7° a 8°

No obstante en la siguiente tabla podemos consultar valores típicos de ángulos de salida, radios de transición y mínimos espesores para un correcto diseño y evitar la defectología y excesos de esfuerzos.

Angulo de salida		
Material	Exterior	Interior
Acero		
Martillo	1:10	1:6
Prensa	1:20	1:10
Recalcadora	1:50	1:20
Al y aleaciones Al		
Sin expulsor	1:20	1:20
Con expulsor	1:60	1:60
Cu y Aleaciones de Cu	1:115	1:60

Mínimo espesor de pared	
Sección transversal a 90° de la dirección de forjado	
b o d mm	$S_{1,min}$ mm
Partes forjadas hechas de acero	
<25	2-3
40-63	5-6
63-100	6-8
160-250	12-16
A mm ²	$S_{1,min}$ mm
Partes forjadas hechas de aleaciones ligeras	
2500-5000	3.5
10000-20000	5.5
40000-80000	8.0

A es el área circular en el caso de piezas redondas, el área del cuadrado circundante en el caso de partes de forma diferente.

Radios de transición, valores mínimos		
h , mm	r_1 mm	r_2 mm
Partes forjadas de acero		
<25	2	4
25-40	3	6
40-63	4	10
63-100	6	16
100-160	8	25
160-250	10	40
250-400	16	63
Partes forjadas hechas de aleaciones ligeras		
<4	1.6	2.5
4-10	1.6	4.0
10-25	2.5	6.0
25-40	4.0	10.0
40-63	6.0	16.0
63-100	10.0	20.0

Mínimo espesor de pared		
Sección transversal en la dirección de la forja		
h , mm	r_1 mm	S_2 mm
Partes forjadas de acero		
<10		3
10-16	2	4
16-25	2	5
25-40	3	8
40-63	4	12
63-100	6	20

h , mm	r_1 mm	$S_{3,min}$, mm	
		costilla	pared
Partes forjadas de aleaciones ligeras			
6-10	1	3.5	
10-16	1.5	4.5	3
16-25	2.0	6.0	4
25-40	2.5	7.5	5

Tabla. 1. Valores de ángulos de salida, radios y espesores mínimos. [2]

2 LA REBABA

Las estampas se fabrican mecanizando un hueco, el cual resultará ser el canal de rebaba, en el perímetro de cada troquel. Dicho hueco servirá como paso del material sobrante al completarse la pieza dentro de la estampa, formando la rebaba en dirección a la zona colectora denominada “alojamiento de rebaba”.

3 LOCALIZACIÓN DEL CANAL DE REBABA

Otro elemento importante en el diseño de estampas es la localización y dimensión de la línea de partición, es decir la zona de rebaba, el cual dividirá las dos estampas y permitirá el flujo del material excedente. Es lógico saber que depende de la forma de la pieza, no obstante se deben considerar ciertas normas:

- Debe dividir la forja en dos partes con la misma profundidad, de esta forma se puede minimizar el ángulo de salida.
- Evitar la aproximación a la orilla de la forja la cavidad de rebaba, de lo contrario complicaría el proceso de rebabado.
- Siempre que sea posible debe localizarse en un único plano, de tal forma se facilitarán las operaciones futuras de mecanización.
- Debe estar posicionada de manera que facilite el flujo de material excedente, pudiendo darse el caso de necesitar una línea de rebaba con quiebres.
- Se debe considerar la siguiente operación de mecanizado, de tal manera que la posición de rebaba ayude a la correcta sujeción de la pieza durante el proceso.

Dicho de otra forma la línea de rebaba es el límite donde se produce la deformación de la estampa. Por lo tanto en la elección de la línea de rebaba, estamos decidiendo el sentido de la deformación.

4 DIMENSIONES DE LA REBABA

Podemos diferenciar dos zonas entre las matrices:

- El cordón de la matriz, definida por su espesor ε y su anchura λ , localizada en el contorno de la pieza es la zona en la que fluirá el material sobrante.
- El alojamiento de la rebaba, está definido por su espesor e , su anchura l y finalmente por el ángulo de entrada al alojamiento α .

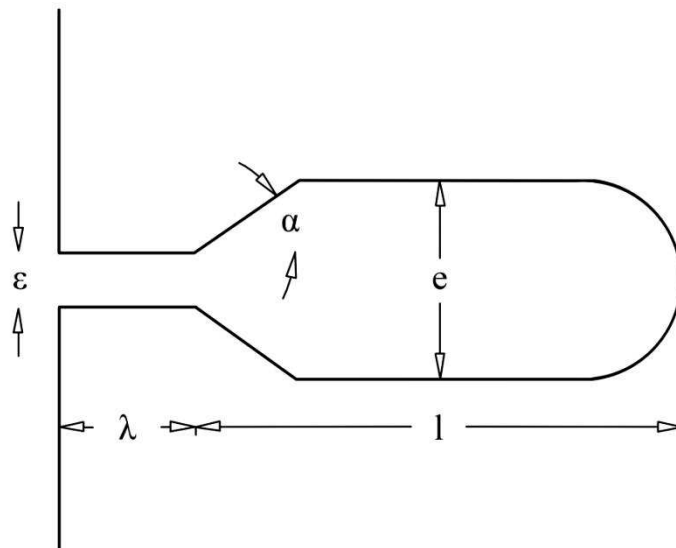


Fig. 40 Dimensiones del canal de rebaba

Por otro lado en las piezas finales podemos distinguir:

- El cordón de rebaba: formado por el cordón de la matriz y por lo tanto definido por las mismas variables.
- La rebaba: se trata del material sobrante que atraviesa el cordón de la matriz y se aloja en el alojamiento de rebaba.

Para el dimensionamiento de sus medidas, suelen ser comunes los siguientes valores:

- $e \approx 2\varepsilon$ hasta 3ε

- ε puede variar desde 1 mm hasta 6 mm
- $\alpha \approx 30^\circ$
- $8 < \frac{2\lambda}{\varepsilon} < 14$
- $L > 8e$

Los valores de ε y λ , provocan un aumento de la presión por el rozamiento de manera que sea más sencillo el flujo de material para rellenar los huecos dentro de la matriz y no perder material por el canal de rebaba.

ANEXO III. RESULTADOS.

En el presente anexo se muestran todos los resultados extraídos durante las simulaciones realizadas en cada uno de los casos.

RESULTADOS DEL ANALISIS I

1.1 Canal de rebaba 1 mm.

1.1.1 Fuerzas de reacción

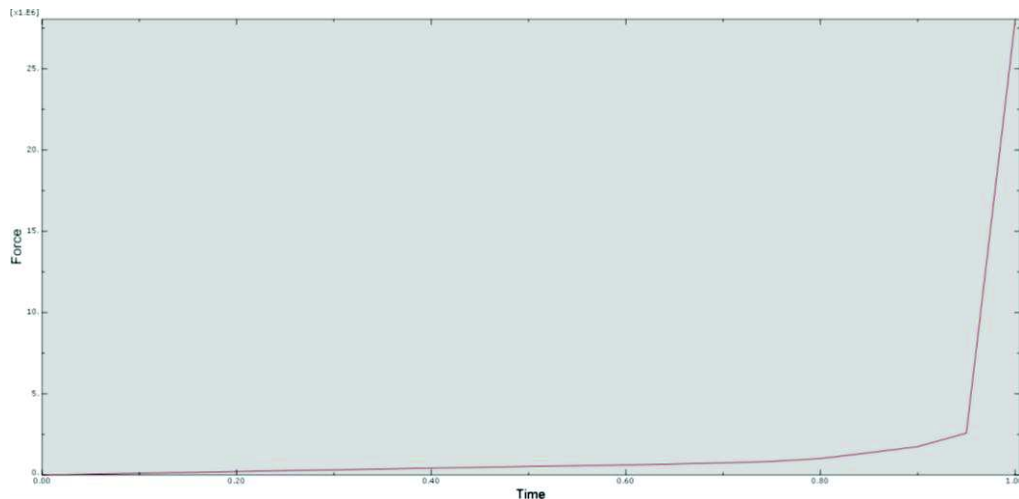


Fig. 41 Evolución Fuerza de reacción espesor 1 mm

Edit XY Data		
Name: _RF:Magnitude Pl: estampa superior-1 N: 210		
	X	Y
1	0	0
2	0.0500012	52730.2
3	0.100001	107740
4	0.150001	162504
5	0.2	215185
6	0.25	265421
7	0.300001	319293
8	0.350001	369954
9	0.400001	423463
10	0.45	474628
11	0.5	527281
12	0.550001	569556
13	0.6	618671
14	0.650001	680072
15	0.7	743940
16	0.750001	838041
17	0.8	1.01474E+006
18	0.850001	1.3735E+006
19	0.9	1.74884E+006
20	0.95	2.57882E+006
21	1	2.8175E+007

Fig. 42 Valores Fuerza reacción espesor 1 mm

1.1.2 Tensiones Von Mises

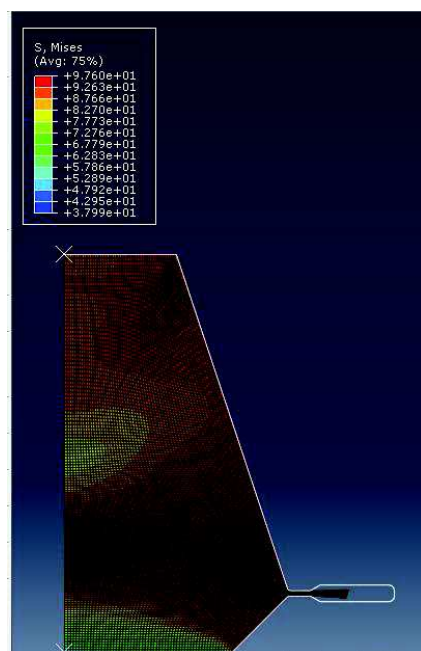


Fig. 43 Diagrama distribución tensión Von Mises final canal 1 mm

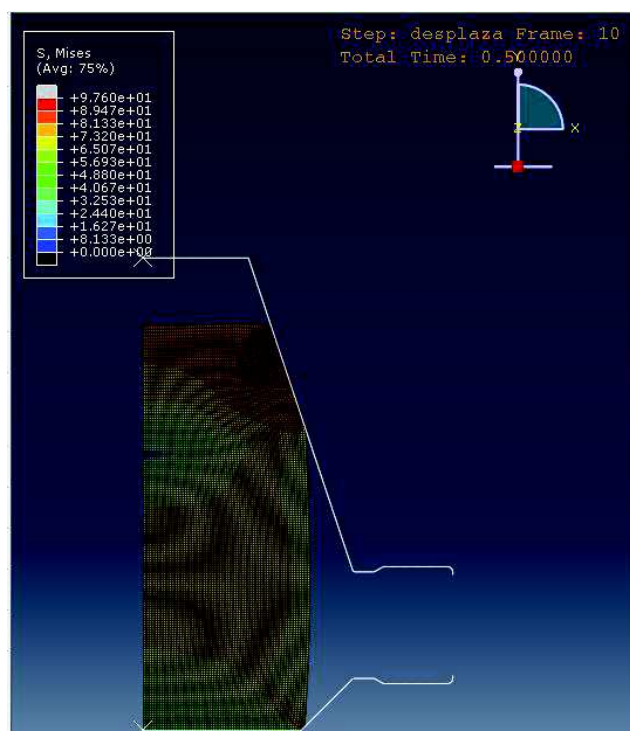


Fig. 44 Diagrama distribución tensión Von Mises a medio recorrido canal 1 mm

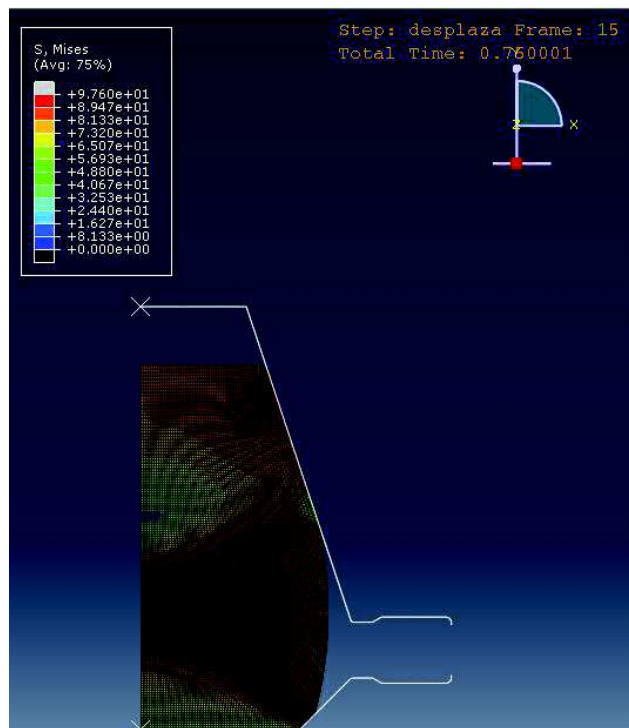


Fig. 45 Diagrama distribución tensión Von Mises 75% recorrido canal 1 mm

1.2 Canal de rebaba 2 mm

1.2.1 Fuerzas de reacción

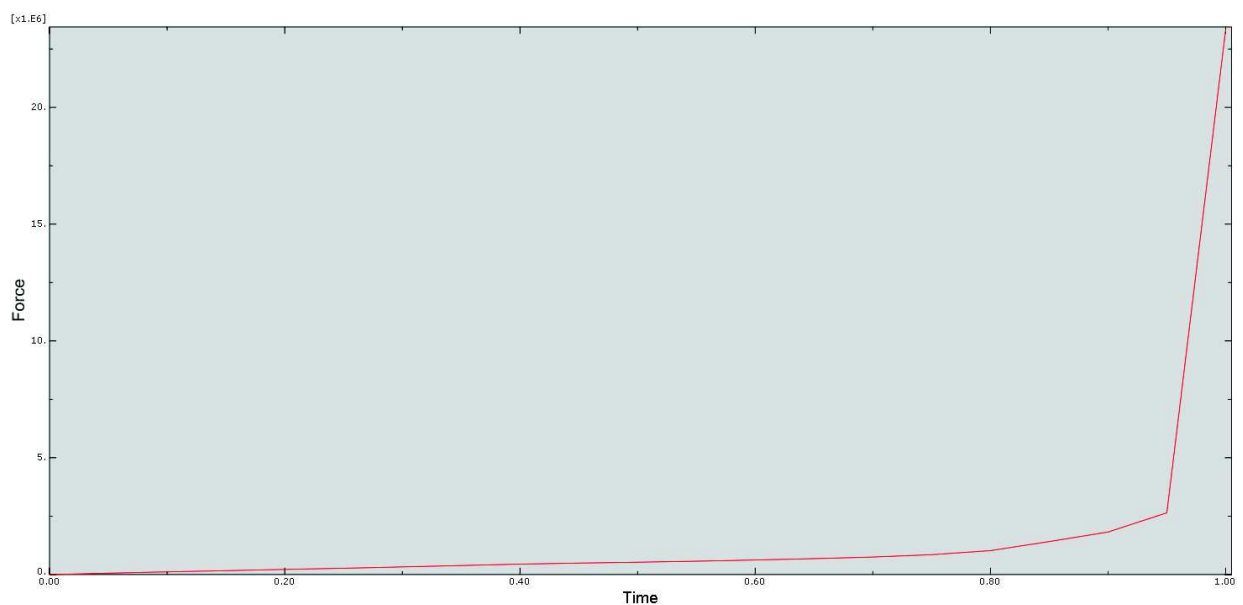


Fig. 46 Evolución Fuerza de reacción espesor 2 mm

Edit XY Data		
Name: _RF:Magnitude Pl: molde superior-1 N: 245		
	X	Y
1	0	0
2	0.0500012	60539.3
3	0.100001	118178
4	0.150001	167676
5	0.2	222935
6	0.25	271402
7	0.300001	329050
8	0.350001	388263
9	0.400001	448611
10	0.450001	492977
11	0.5	530790
12	0.550001	573163
13	0.600001	624764
14	0.650001	683163
15	0.700001	751809
16	0.75	851478
17	0.8	1.02633E+006
18	0.850001	1.41438E+006
19	0.9	1.82138E+006
20	0.95	2.64577E+006
21	1	2.33237E+007

Fig. 47 Valores fuerza de reacción espesor 2 mm

1.2.2 Tensiones Von Mises

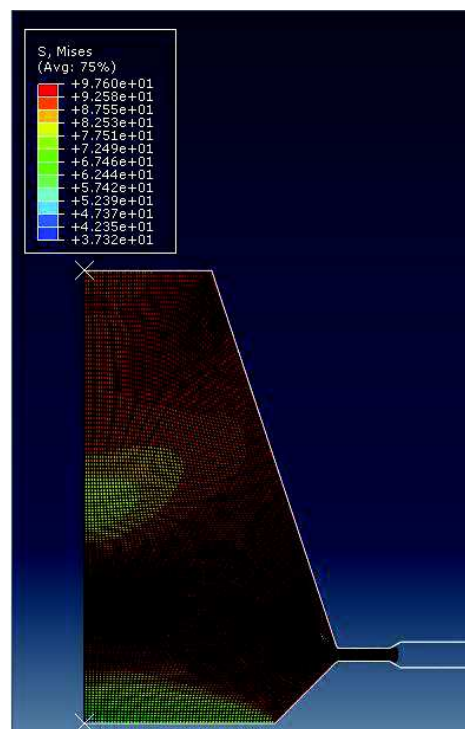


Fig. 48 Diagrama distribución tensión Von Mises final canal 2 mm

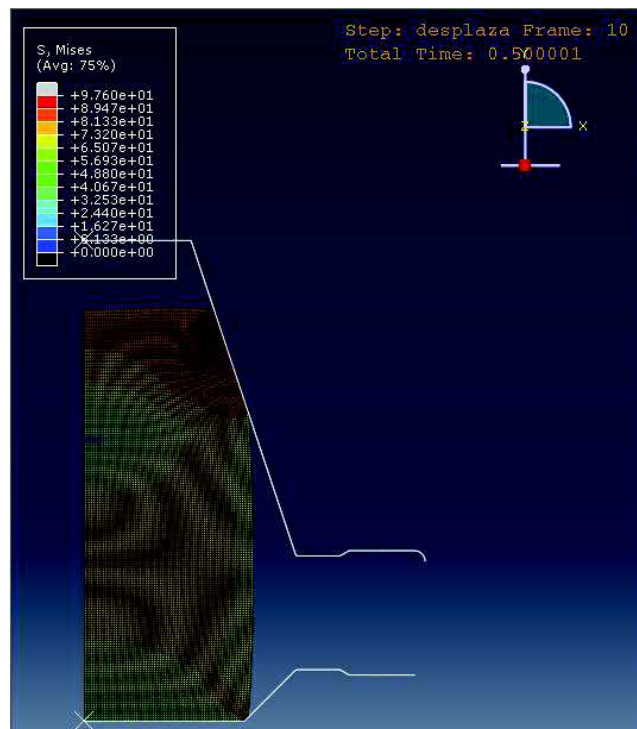


Fig. 49 Diagrama distribución tensión Von Mises medio recorrido canal 2 mm

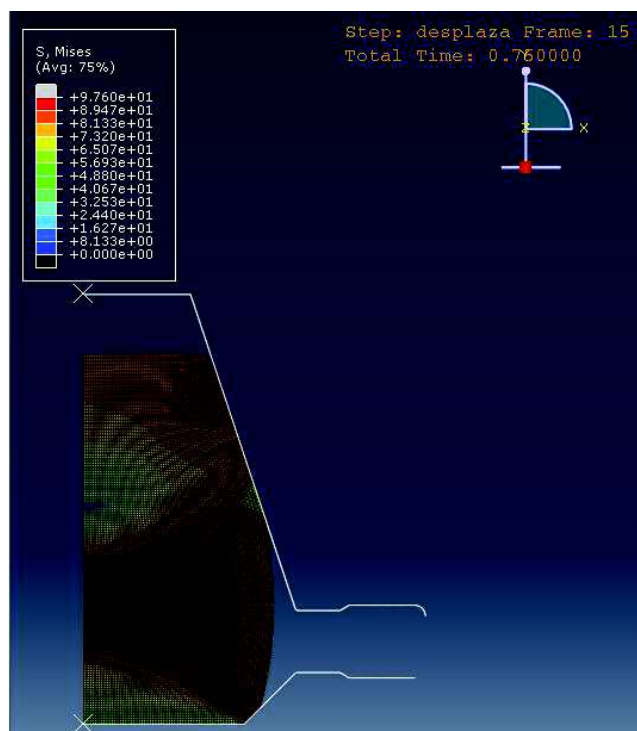


Fig. 50 Diagrama distribución tensión Von Mises 75% recorrido canal 2 mm

1.3 Canal de rebaba 2.25 mm

1.3.1 Fuerzas de reacción

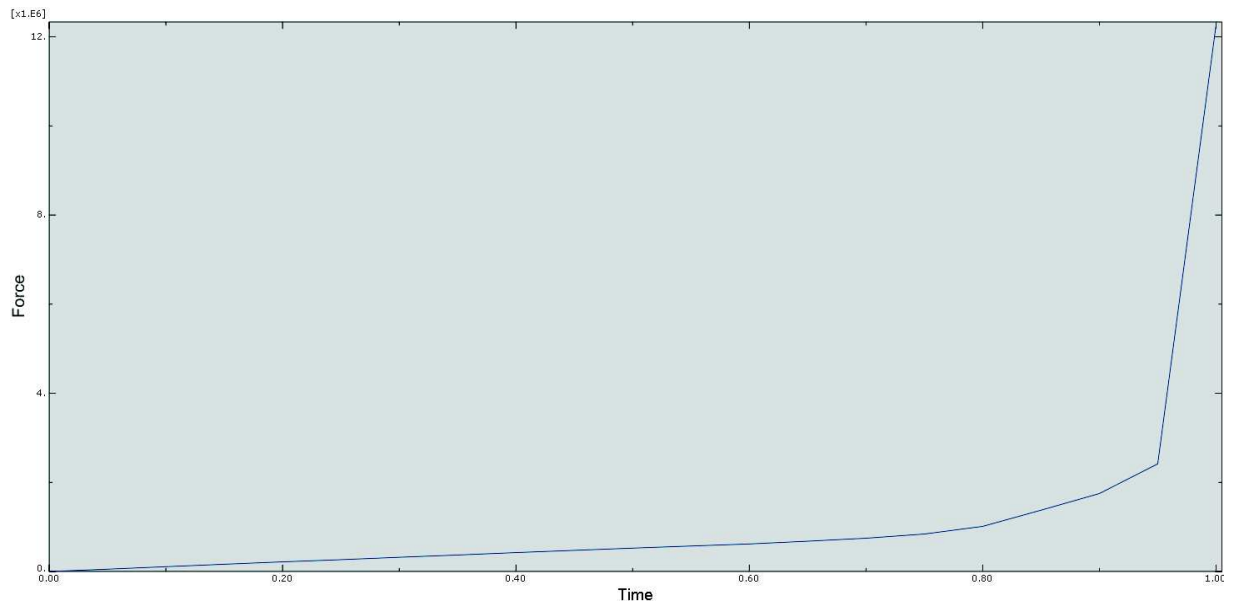


Fig. 51 Evolución Fuerza de reacción espesor 2.25 mm

Edit XY Data			×
Name: _RF:Magnitude Pl: estampa superior-1 N: 218			
	X	Y	
1	0	0.196555	
2	0.0500012	52158.5	
3	0.100001	107906	
4	0.150001	162972	
5	0.2	216214	
6	0.25	265428	
7	0.300001	319180	
8	0.350001	370084	
9	0.400001	424245	
10	0.450001	474295	
11	0.500001	524786	
12	0.550001	571754	
13	0.600001	618431	
14	0.65	679909	
15	0.7	746994	
16	0.750001	841024	
17	0.800001	1.01287E+006	
18	0.85	1.3763E+006	
19	0.9	1.74961E+006	
20	0.950001	2.41514E+006	
21	1	1.22709E+007	

Fig. 52 Valores fuerza de reacción espesor 2.25 mm

1.3.2 Tensiones Von Mises

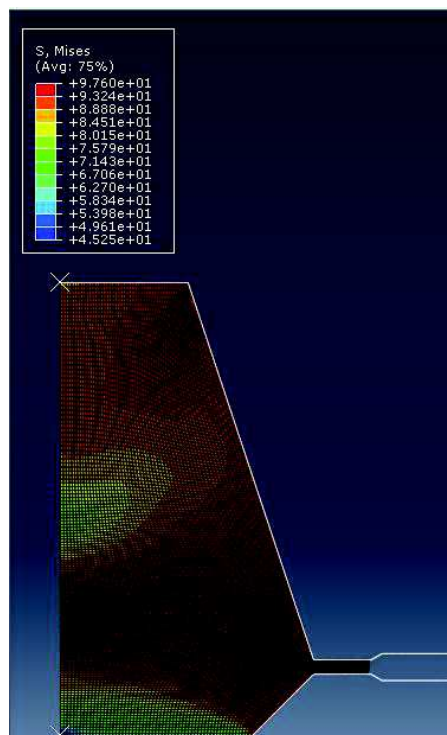


Fig. 53 Diagrama distribución tensión Von Mises final canal 2.25 mm

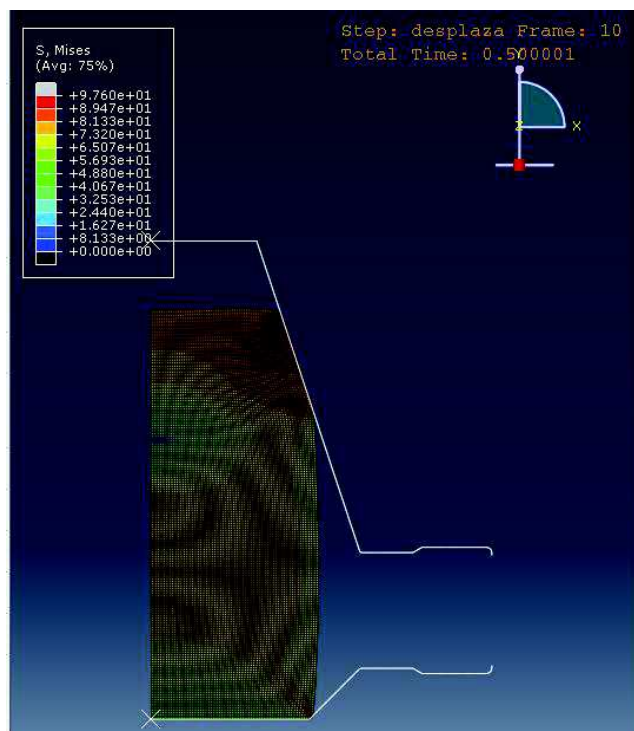


Fig. 54 Diagrama distribución tensión Von Mises medio recorrido canal 2.25 mm

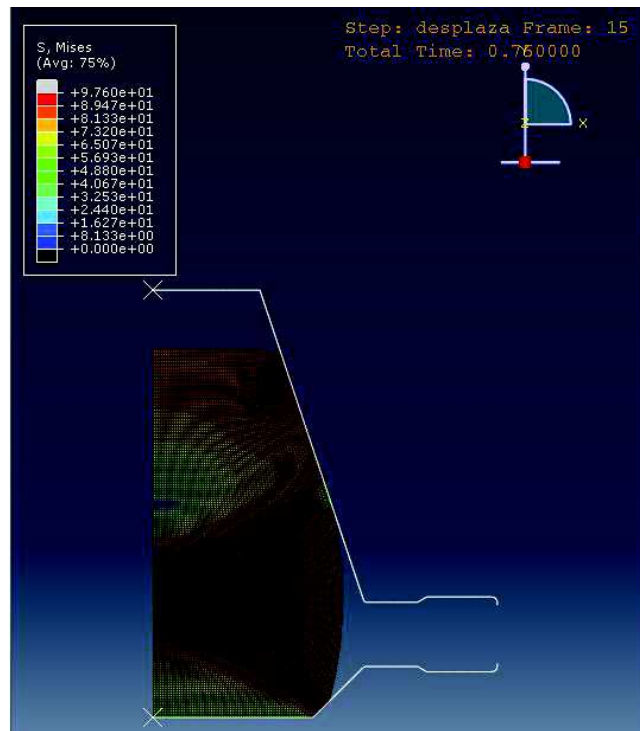


Fig. 55 Diagrama distribución tensión Von Mises 75% recorrido canal 2.25 mm

1.4 Canal de rebaba 2.5 mm

1.4.1 Fuerzas de reacción

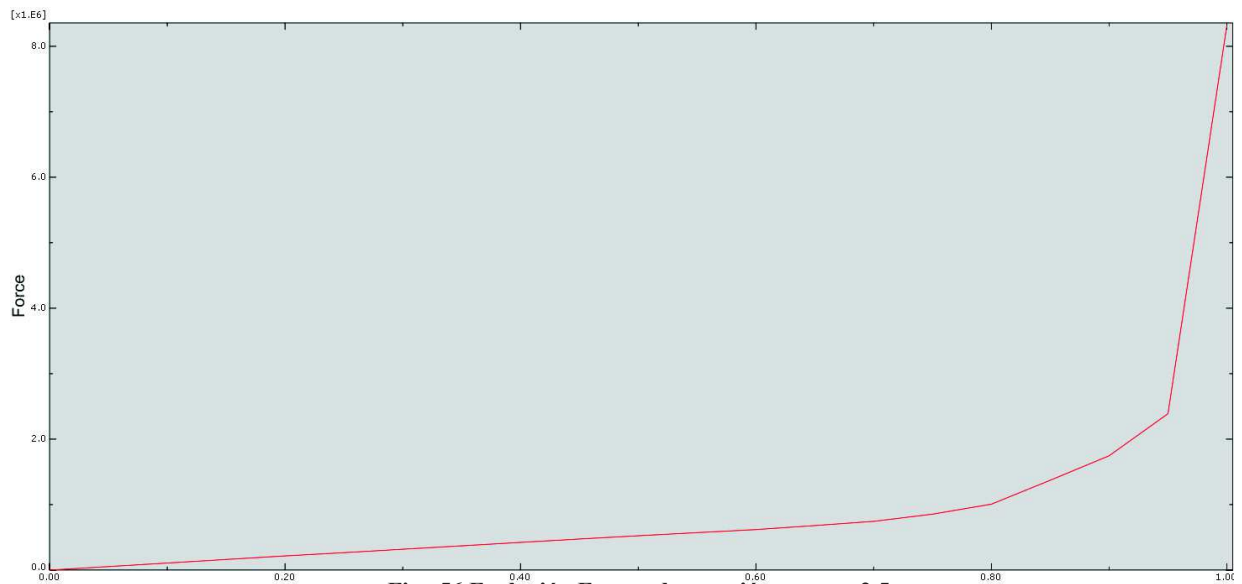


Fig. 56 Evolución Fuerza de reacción espesor 2.5 mm

Edit XY Data			×
Name: _RF:Magnitude Pl: estampa superior-1 N: 219			
	X	Y	
1	0	0	
2	0.0500012	53964.9	
3	0.100001	107781	
4	0.150001	162612	
5	0.200001	216551	
6	0.25	266270	
7	0.300001	318990	
8	0.350001	370705	
9	0.400001	423277	
10	0.450001	474949	
11	0.500001	524555	
12	0.55	572380	
13	0.600001	618961	
14	0.650001	680303	
15	0.700001	744862	
16	0.75	854556	
17	0.800001	1.0072E+006	
18	0.850001	1.37252E+006	
19	0.900001	1.74651E+006	
20	0.95	2.38919E+006	
21	1	8.31585E+006	

Fig. 57 Valores fuerza de reacción espesor 2.5 mm

1.4.2 Tensión Von Mises

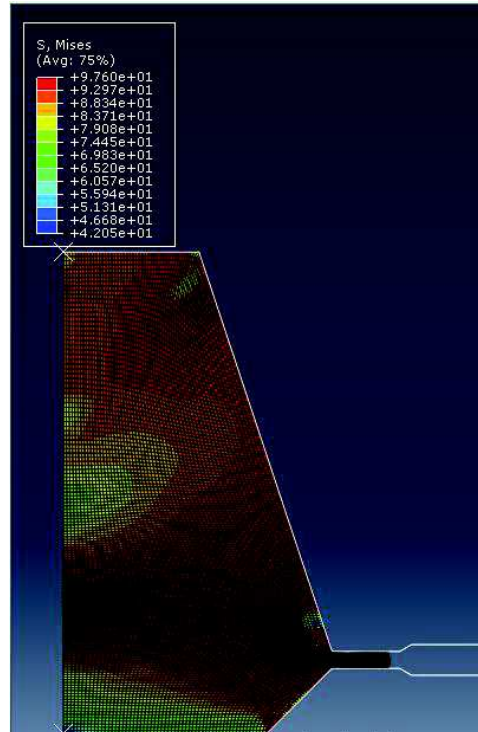


Fig. 58 Diagrama distribución tensión Von Mises final canal 2.5 mm

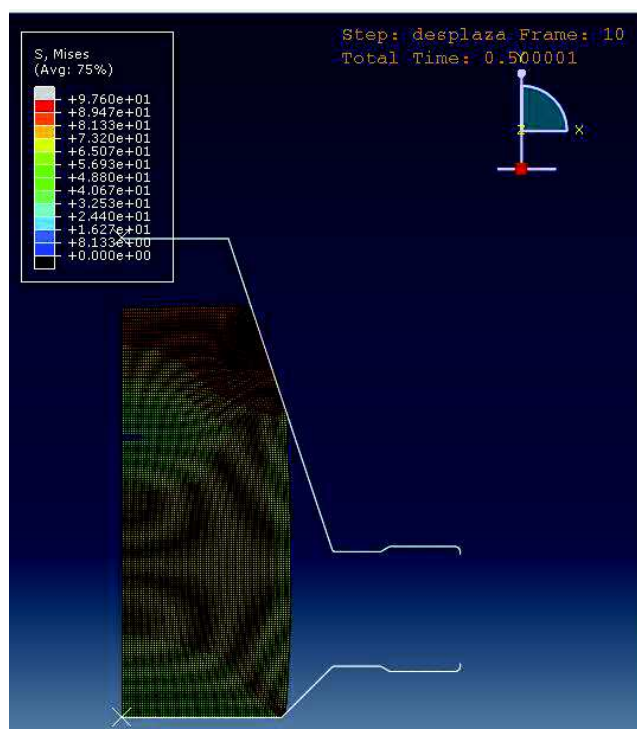


Fig. 59 Diagrama distribución tensión Von Mises medio recorrido canal 2.5 mm

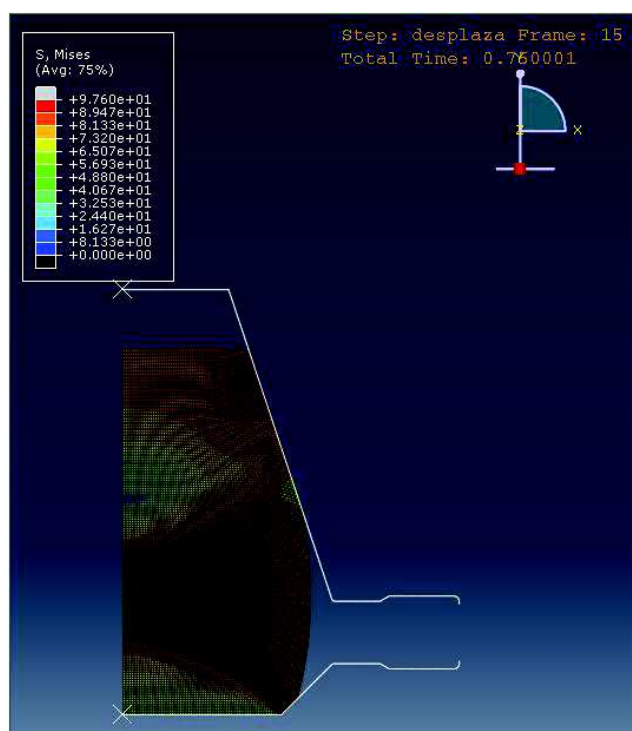


Fig. 60 Diagrama distribución tensión Von Mises 75% recorrido canal 2.5 mm

1.5 Canal de rebaba 2.75 mm

1.5.1 Fuerzas de reacción

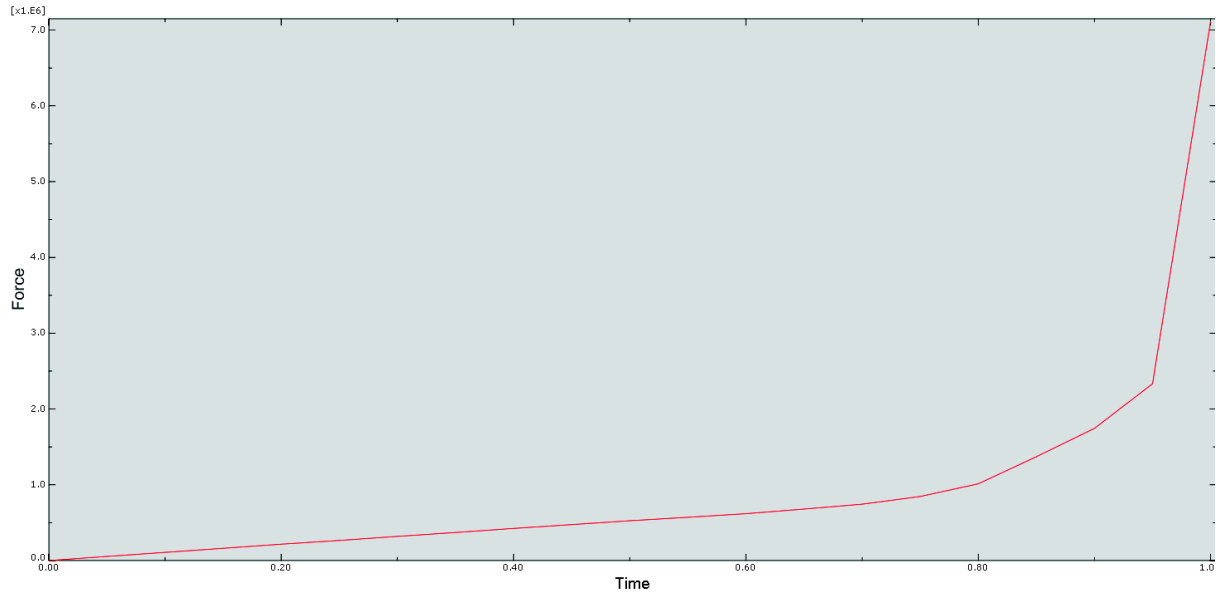


Fig. 61 Evolución Fuerza de reacción espesor 2.75 mm

Edit XY Data		
Name: _RF:Magnitude PI: estampa superior-1 N: 221		
	X	Y
1	0	0.429336
2	0.0500012	54884.5
3	0.100001	108158
4	0.150001	161856
5	0.2	216317
6	0.25	265682
7	0.300001	319113
8	0.35	370421
9	0.400001	424226
10	0.45	474739
11	0.500001	525583
12	0.550001	571129
13	0.6	618751
14	0.650001	679857
15	0.7	743893
16	0.750001	845855
17	0.800001	1.01284E+006
18	0.850001	1.3703E+006
19	0.9	1.74442E+006
20	0.95	2.33262E+006
21	1	7.1127E+006

Fig. 62 Valores fuerza de reacción espesor 2.75 mm

1.5.2 Tensión Von Mises

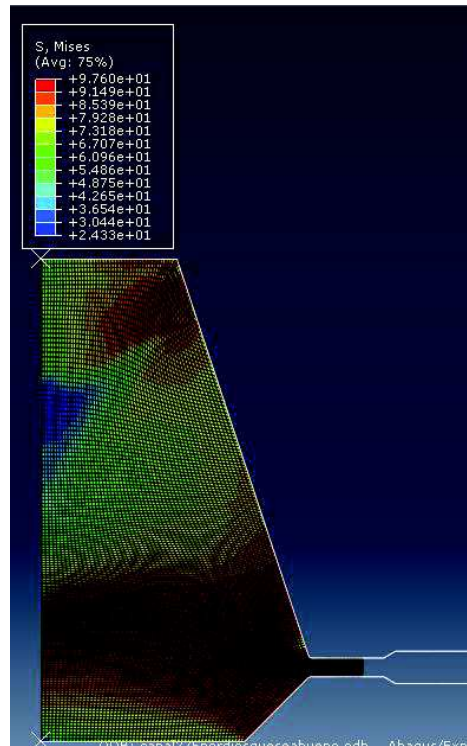


Fig. 63 Diagrama distribución tensión Von Mises final canal 2.75 mm

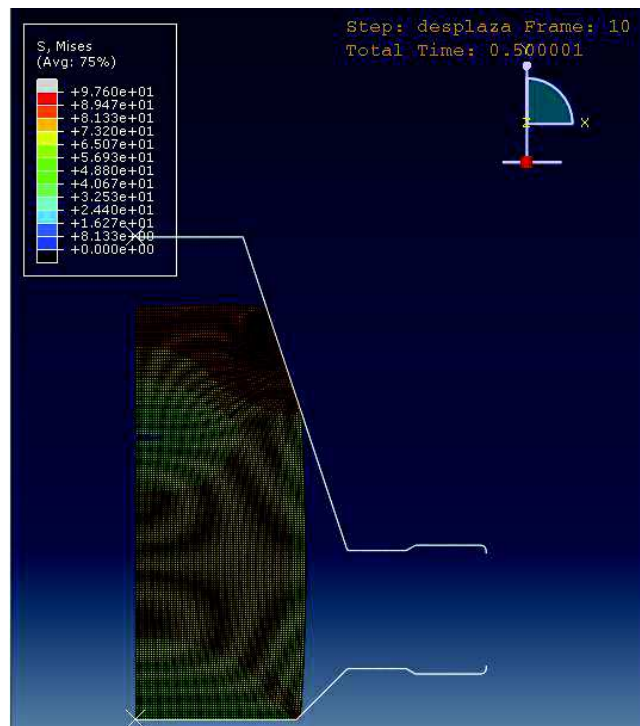


Fig. 64 Diagrama distribución tensión Von Mises medio recorrido canal 2.75 mm

Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zaguán

<http://zaguán.unizar.es>

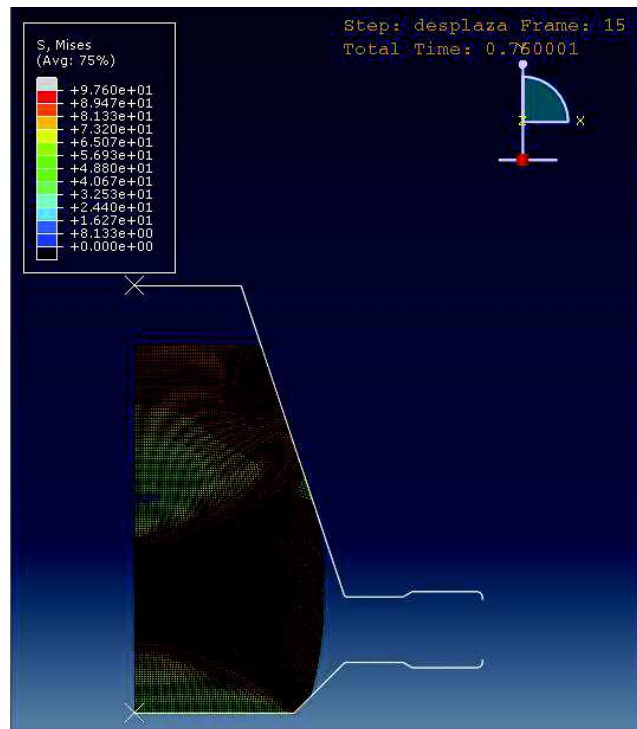


Fig. 65 Diagrama distribución tensión Von Mises 75% recorrido canal 2.75 mm

1.6 Canal de rebaba 3 mm

1.6.1 Fuerzas de reacción

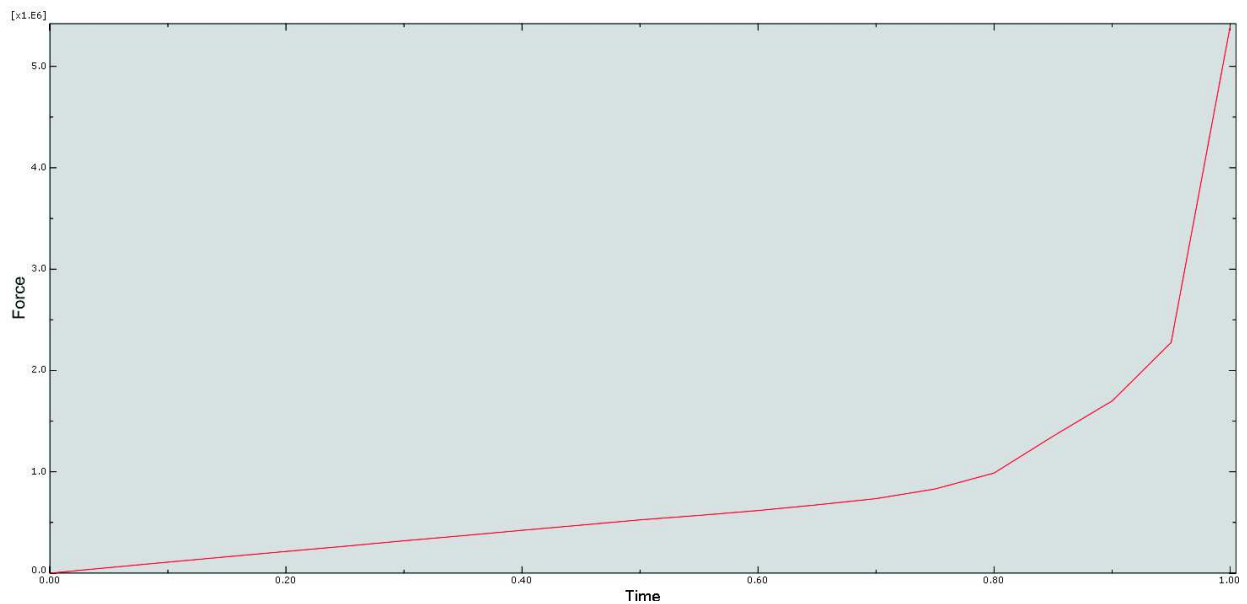


Fig. 66 Evolución Fuerza de reacción espesor 3 mm

Edit XY Data		
Name: _RF:Magnitude Pl: estampa superior-1 N: 240		
	X	Y
1	0	0
2	0.0500012	54980.2
3	0.100001	108933
4	0.150001	161710
5	0.2	214452
6	0.25	265740
7	0.300001	319538
8	0.350001	370137
9	0.400001	422933
10	0.45	473974
11	0.5	526151
12	0.550001	569963
13	0.6	617944
14	0.650001	674203
15	0.7	735533
16	0.75	830788
17	0.800001	988176
18	0.850001	1.35174E+006
19	0.9	1.69908E+006
20	0.95	2.27572E+006
21	1	5.39471E+006

Fig. 67 Valores fuerza de reacción espesor 3 mm

1.6.2 Tensión Von Mises

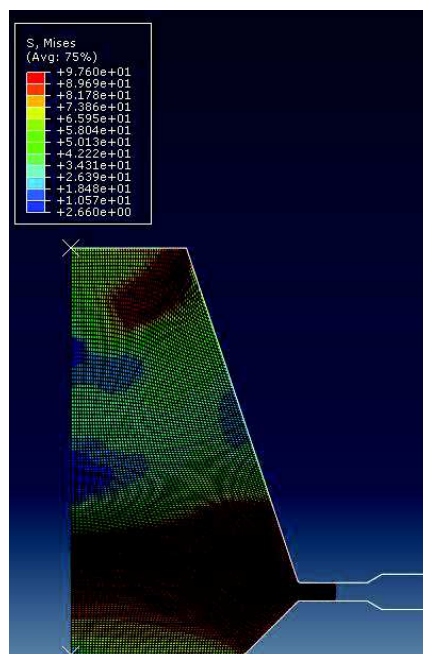


Fig. 68 Diagrama distribución tensión Von Mises final canal 3 mm

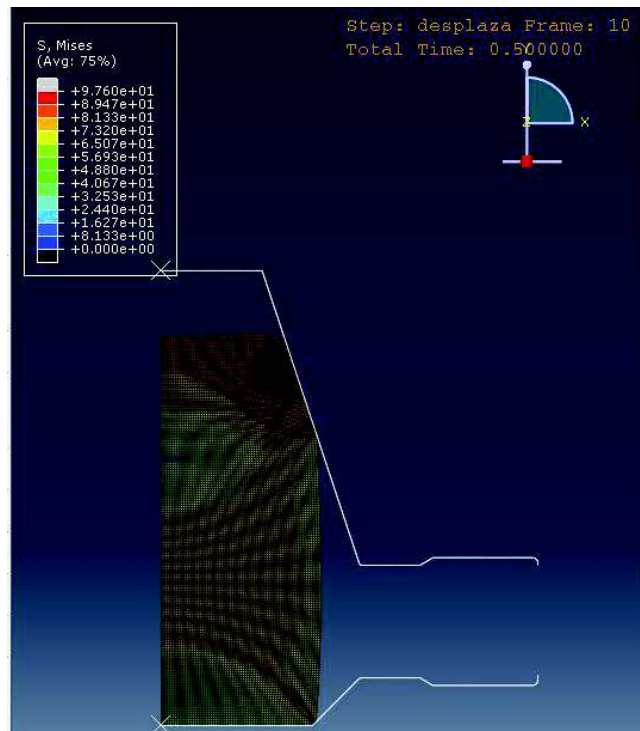


Fig. 69 Diagrama distribución tensión Von Mises medio recorrido canal 3 mm

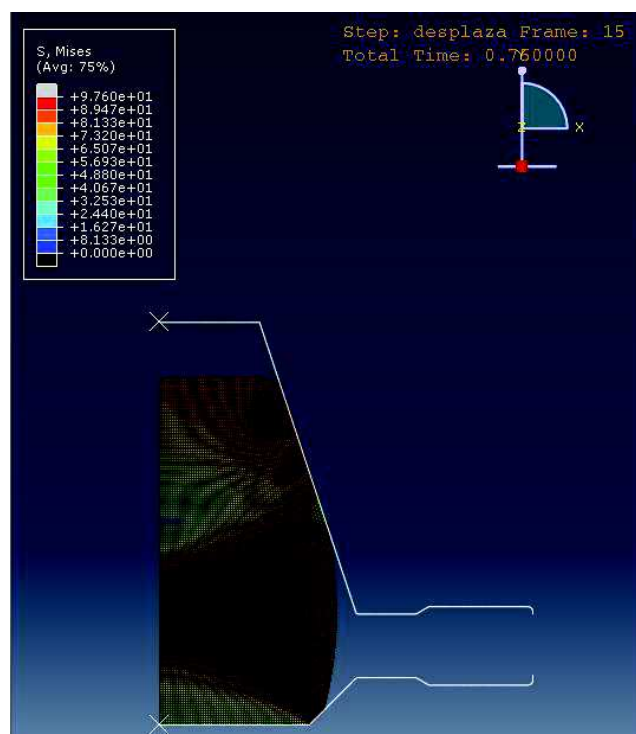


Fig. 70 Diagrama distribución tensión Von Mises 75% recorrido canal 3 mm

1.7 Canal de rebaba 4 mm

1.7.1 Fuerzas de reacción

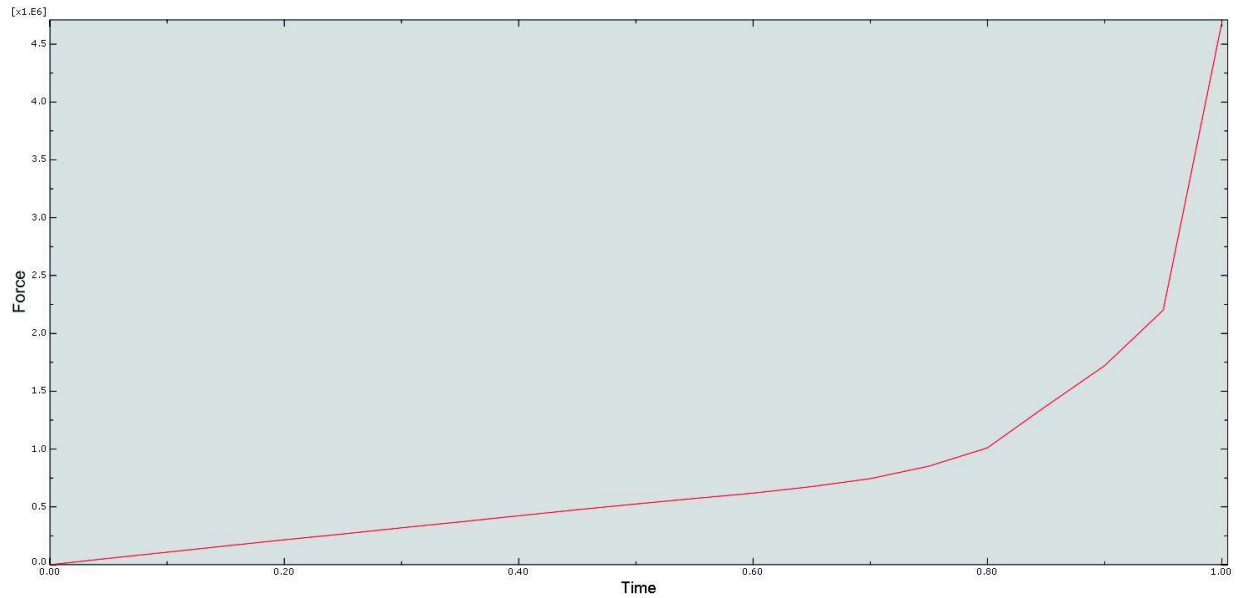


Fig. 71 Evolución Fuerza de reacción espesor 4 mm

Edit XY Data		
Name: _RF:Magnitude Pl: estampa superior-1 N: 246		
	X	Y
1	0	0
2	0.0500012	55111.9
3	0.100001	108362
4	0.150001	162391
5	0.200001	215573
6	0.250001	265811
7	0.3	319300
8	0.350001	370384
9	0.4	423197
10	0.45	475771
11	0.500001	524947
12	0.55	572759
13	0.6	618677
14	0.650001	675331
15	0.700001	744093
16	0.75	852153
17	0.800001	1.01028E+006
18	0.85	1.3712E+006
19	0.900001	1.72089E+006
20	0.950001	2.20133E+006
21	1	4.68643E+006

Fig. 72 Valores fuerza de reacción espesor 4 mm

1.7.2 Tensión Von Mises

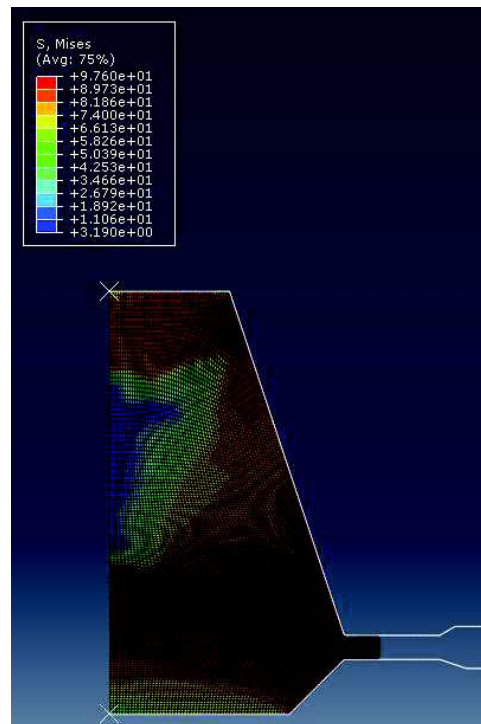


Fig. 73 Diagrama distribución tensión Von Mises final canal 4 mm

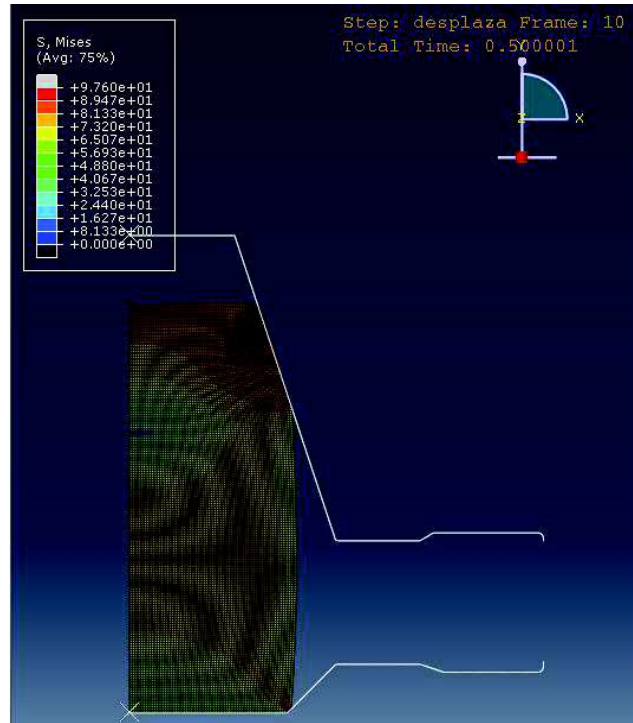


Fig. 74 Diagrama distribución tensión Von Mises medio recorrido canal 4 mm

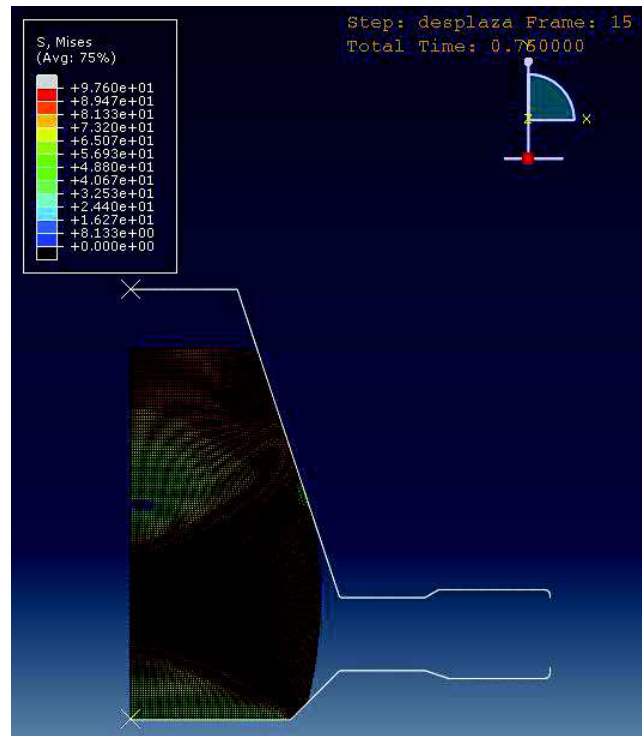


Fig. 75 Diagrama distribución tensión Von Mises 75% recorrido canal 4 mm

1.8 Canal de rebaba 5 mm

1.8.1 Fuerzas de reacción

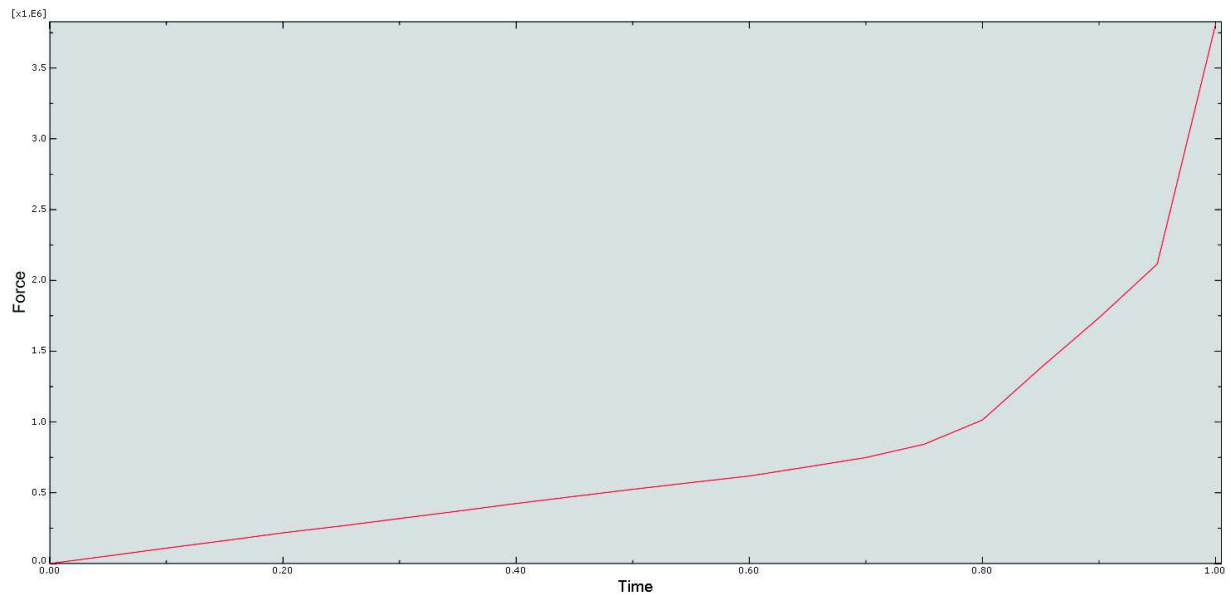


Fig. 76 Evolución Fuerza de reacción espesor 5 mm

Edit XY Data			×
Name: _RF:Magnitud Pl: estampa superior-1 N: 252			
	X	Y	
1	0	0	
2	0.0500012	53788.7	
3	0.100001	108944	
4	0.150001	161921	
5	0.200001	216980	
6	0.25	265636	
7	0.300001	318191	
8	0.35	370262	
9	0.400001	424260	
10	0.450001	474498	
11	0.500001	524380	
12	0.550001	572017	
13	0.6	618461	
14	0.650001	682999	
15	0.700001	748802	
16	0.75	843002	
17	0.800001	1.01378E+006	
18	0.85	1.38207E+006	
19	0.900001	1.73611E+006	
20	0.950001	2.11611E+006	
21	1	3.80776E+006	

Fig. 77 Valores fuerza de reacción espesor 5 mm

1.8.2 Tensión Von Mises

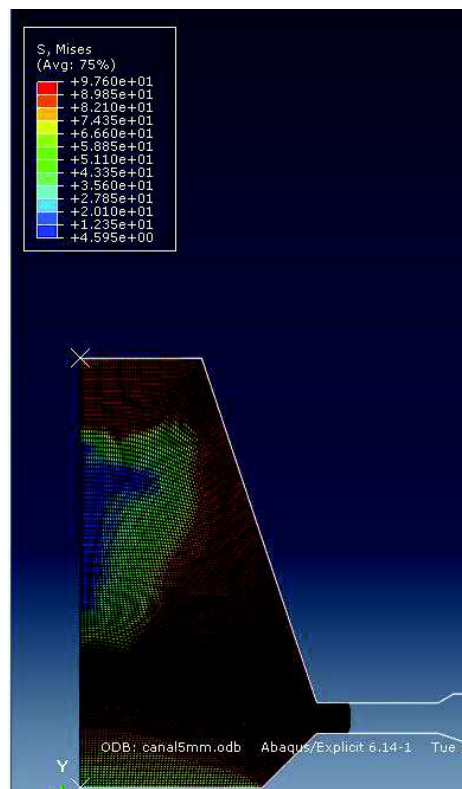


Fig. 78 Diagrama distribución tensión Von Mises final canal 5 mm

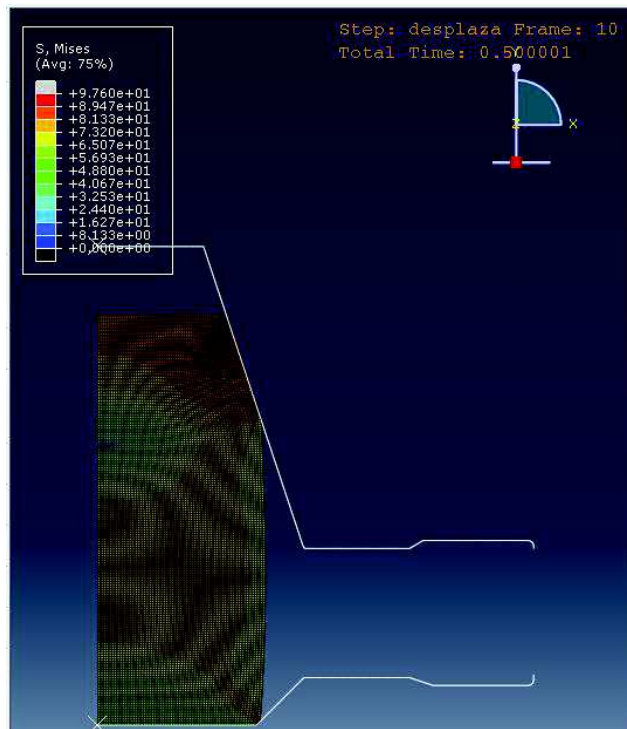


Fig. 79 Diagrama distribución tensión Von Mises medio recorrido canal 5 mm

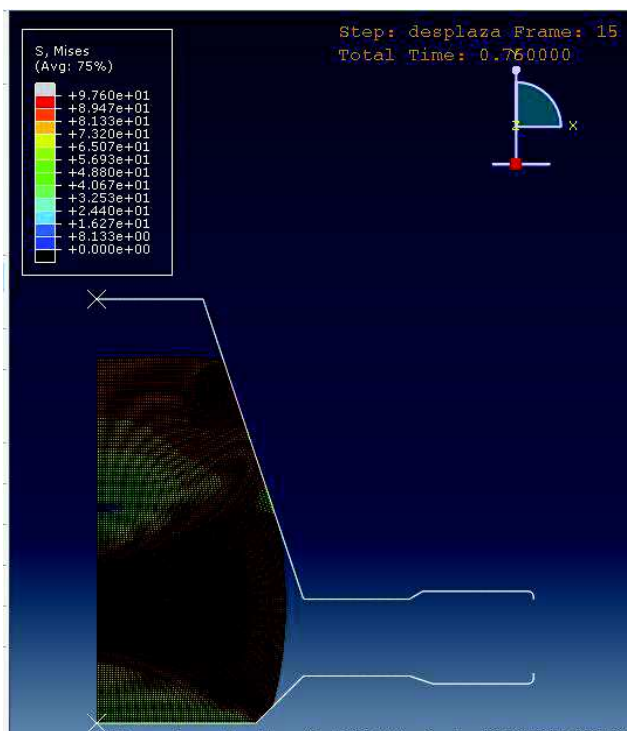


Fig. 80 Diagrama distribución tensión Von Mises 75% recorrido canal 5 mm

1.9Canal de rebaba 6 mm

1.9.1Fuerzas de reacción

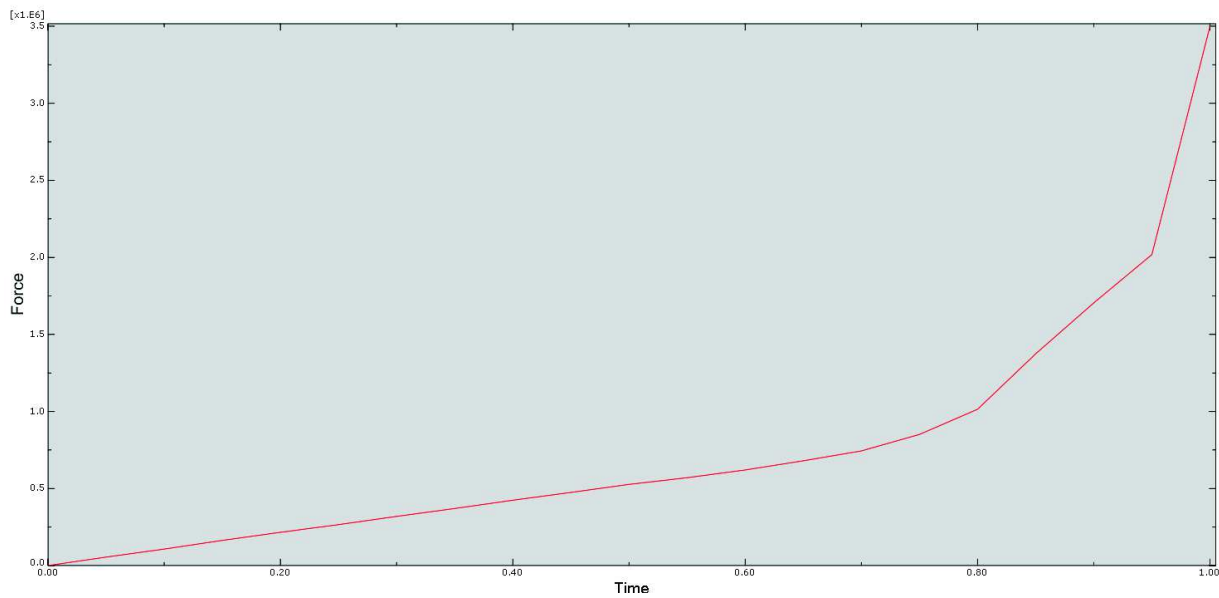


Fig. 81 Evolución Fuerza de reacción espesor 6 mm

Edit XY Data			Name: _RF:Magnitude PI: estampa superior-1 N: 256	
	X	Y		
1	0	0		
2	0.0500012	54995.8		
3	0.100001	106968		
4	0.150001	163306		
5	0.200001	215809		
6	0.250001	265594		
7	0.300001	319121		
8	0.35	370257		
9	0.4	423999		
10	0.450001	474705		
11	0.500001	526781		
12	0.55	570153		
13	0.6	620347		
14	0.650001	679921		
15	0.700001	744092		
16	0.75	851012		
17	0.800001	1.01436E+006		
18	0.850001	1.37418E+006		
19	0.9	1.70472E+006		
20	0.95	2.01789E+006		
21	1	3.49856E+006		

Fig. 82 Valores fuerza de reacción espesor 6 mm

1.9.2 Tensión Von Mises

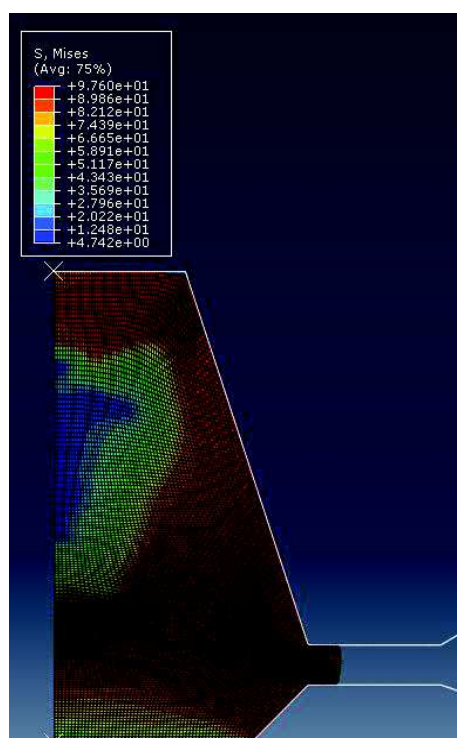


Fig. 83 Diagrama distribución tensión Von Mises final canal 6 mm

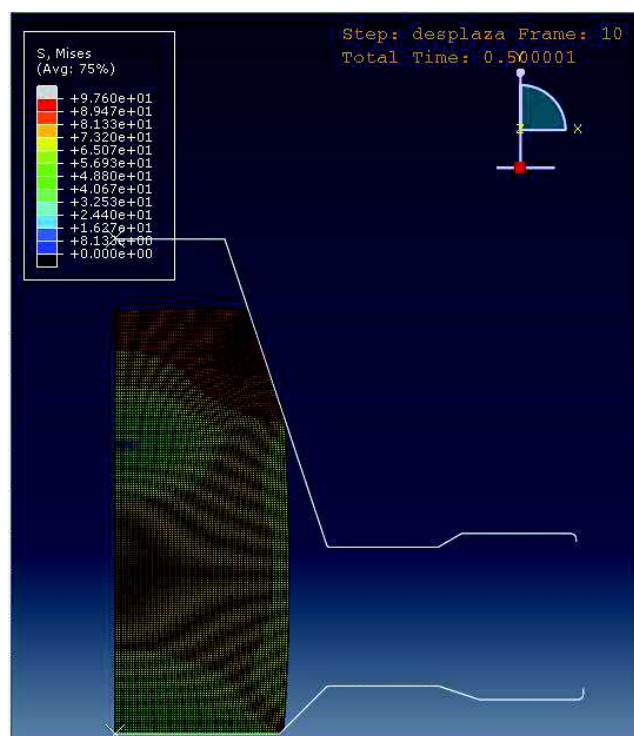


Fig. 84 Diagrama distribución tensión Von Mises medio recorrido canal 6 mm

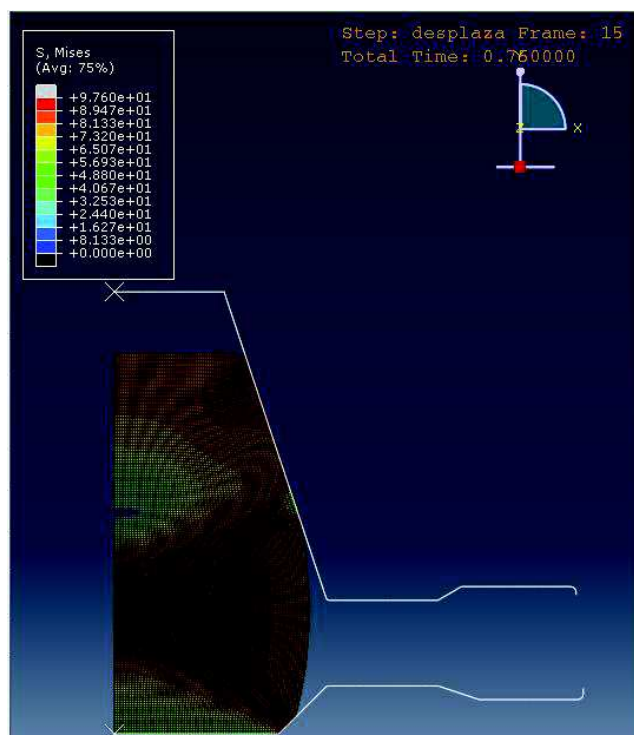


Fig. 85 Diagrama distribución tensión Von Mises 75% recorrido canal 6 mm

1.10 Comparativa de las fuerzas de Reacción

Espesor (mm)	Reacción (MN)	% reducción
1	28.08	-
2	23.33	14.6
2.25	12.27	48.4
2.5	8.316	32.2
2.75	7.113	14.4
3	5.395	24.15
4	4.686	13
5	3.808	18.7
6	3.499	8.11

Tabla 7 Evolución Fuerzas de reacción según espesor de rebaba

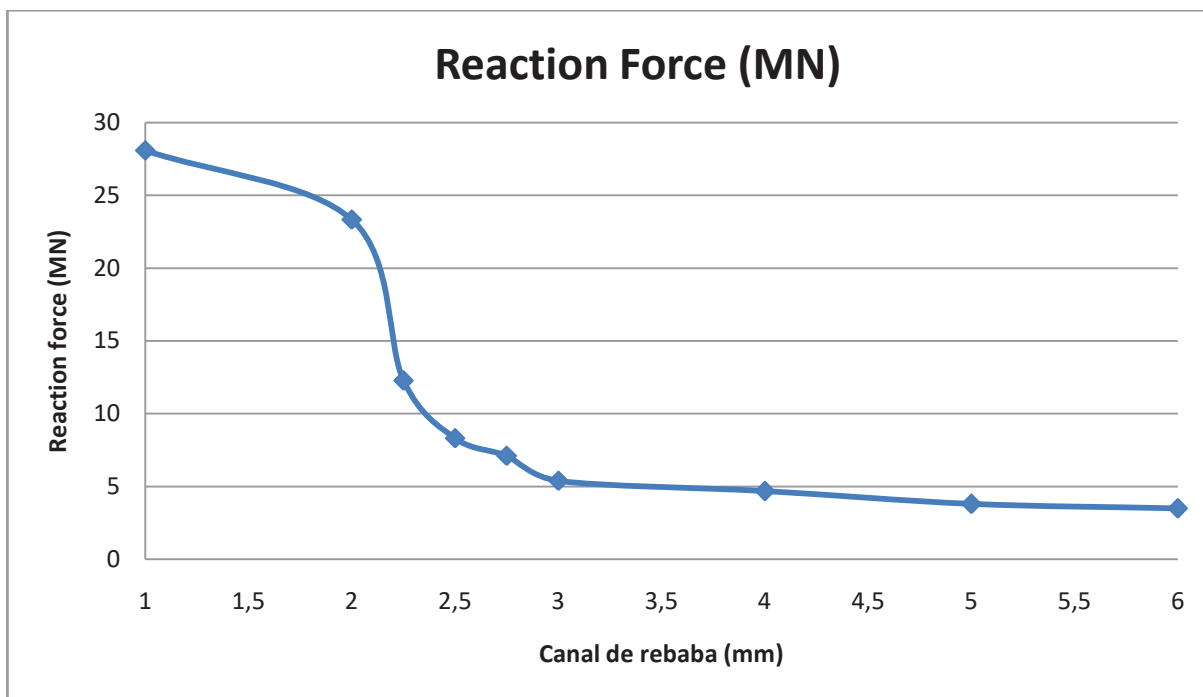


Fig. 86 Evolución Fuerza de reacción según espesor de rebaba

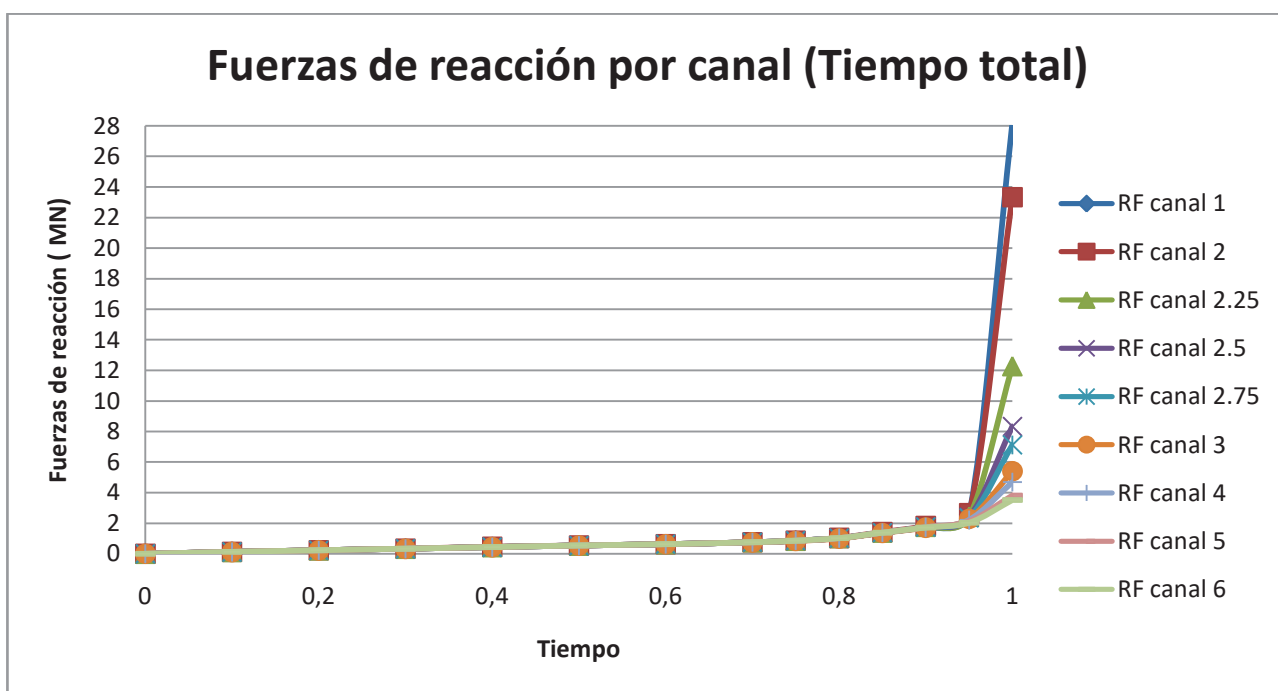


Fig. 87 Evolución Fuerza de reacción en el tiempo

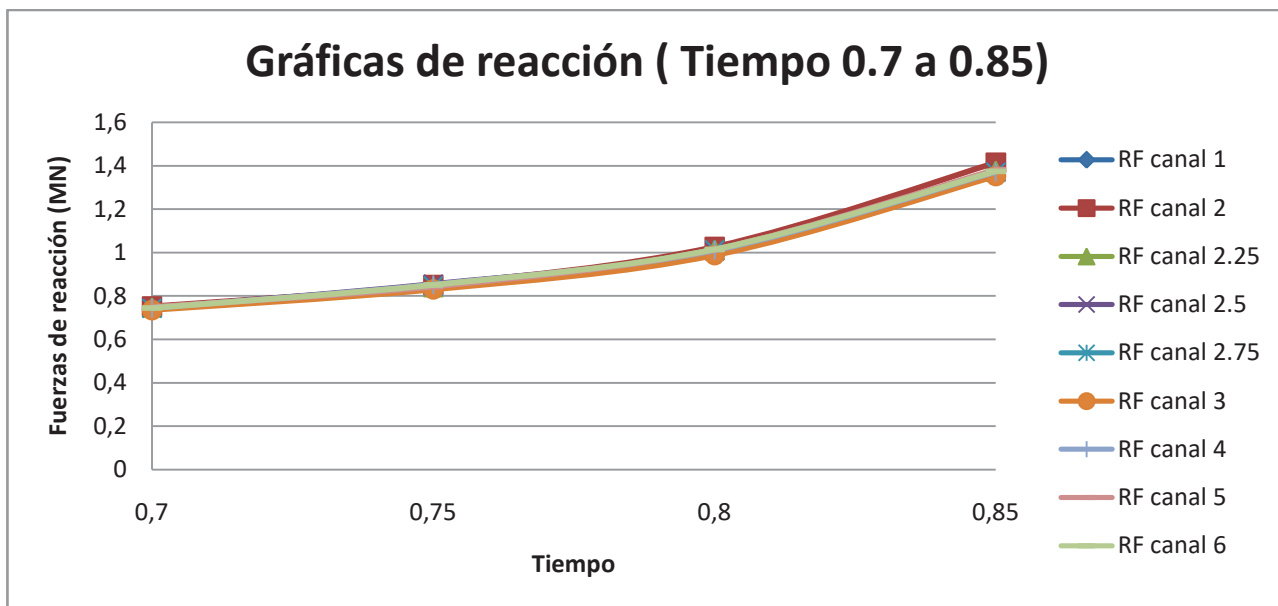


Fig. 88 Detalle evolución fuerza de reacción en el tiempo 0.7 a 0.85

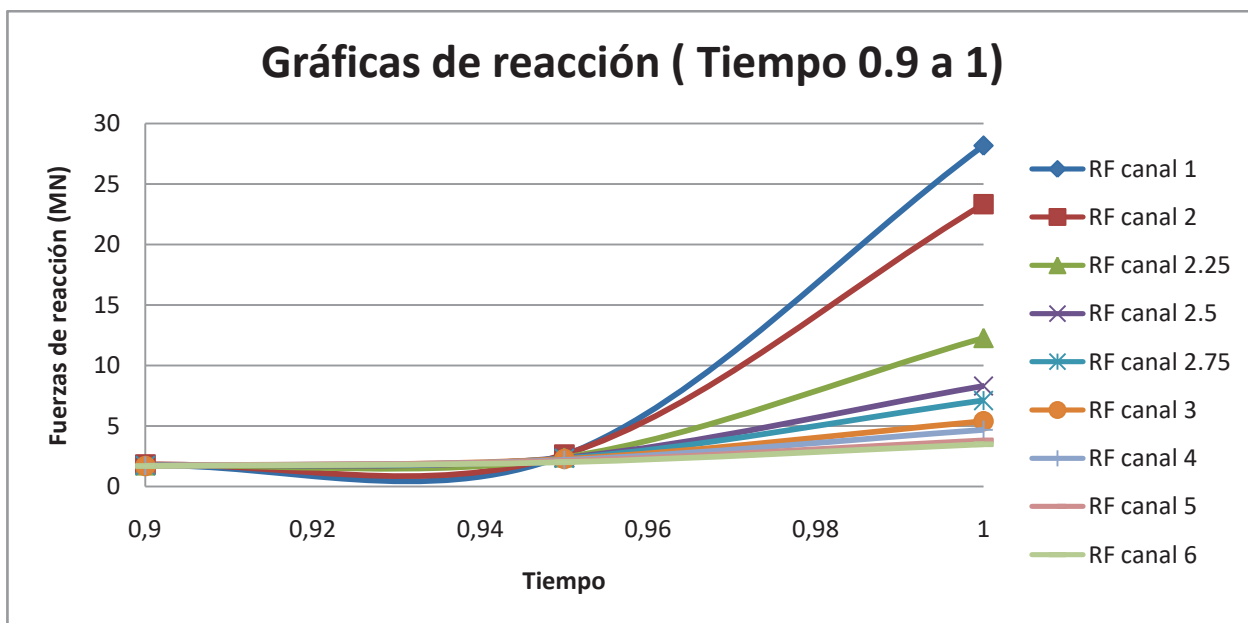


Fig. 89 Detalle evolución fuerza de reacción en el tiempo 0.9 a 1

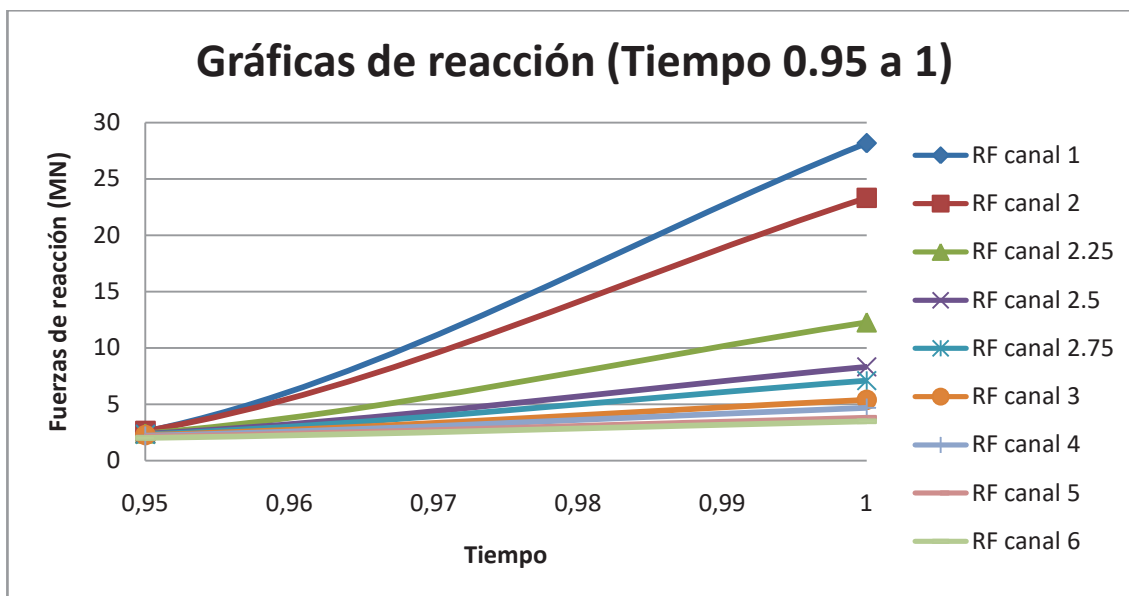


Fig. 90 Detalle evolución fuerza de reacción en el tiempo 0.95 a 1

2 RESULTADOS ANALISIS II

2.1 Canal de rebaba 1 mm

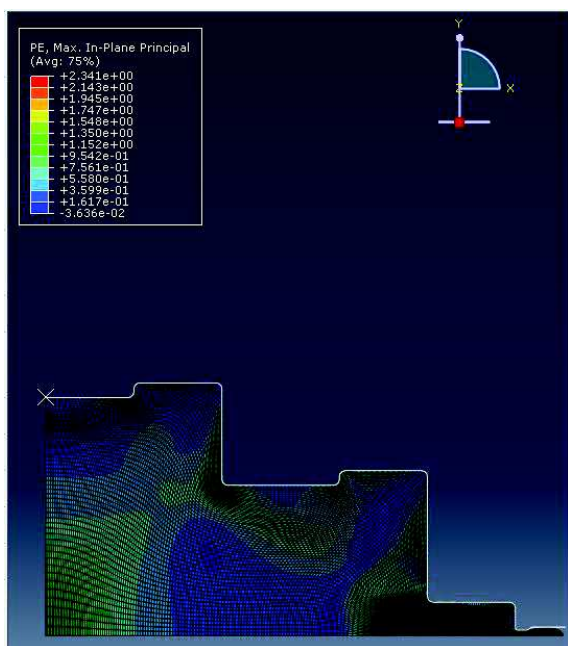


Fig. 91 Def. Máximas (1mm)

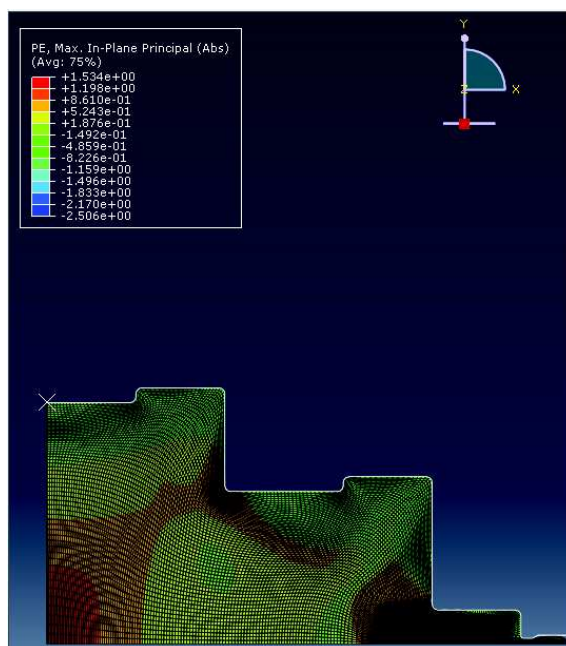


Fig. 92 Def. Absolutas máximas (1mm)

2.2 Canal de rebaba 4 mm

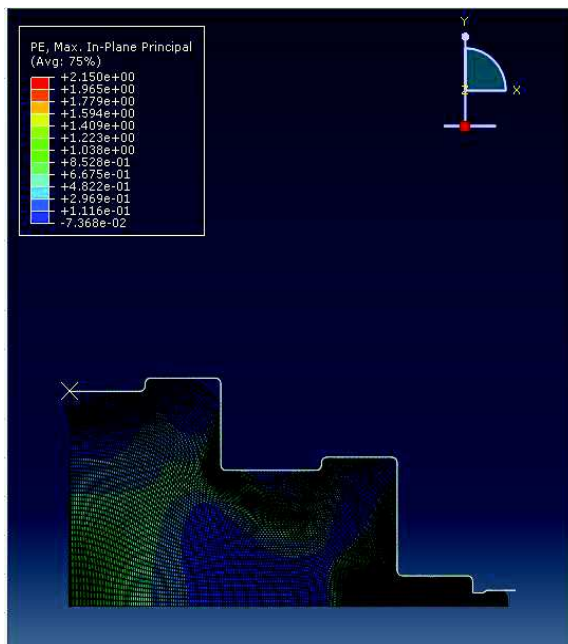


Fig. 93 Def. Máximas (4mm)

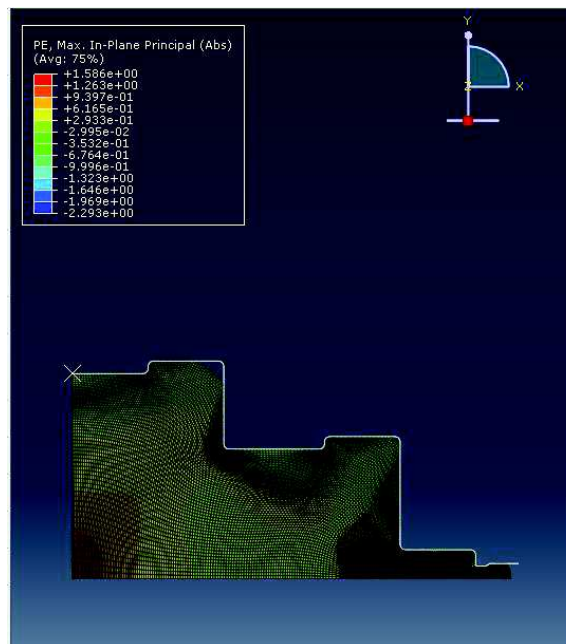


Fig. 94 Def. Absolutas máximas (4mm)

2.3 Canal de rebaba 3 mm

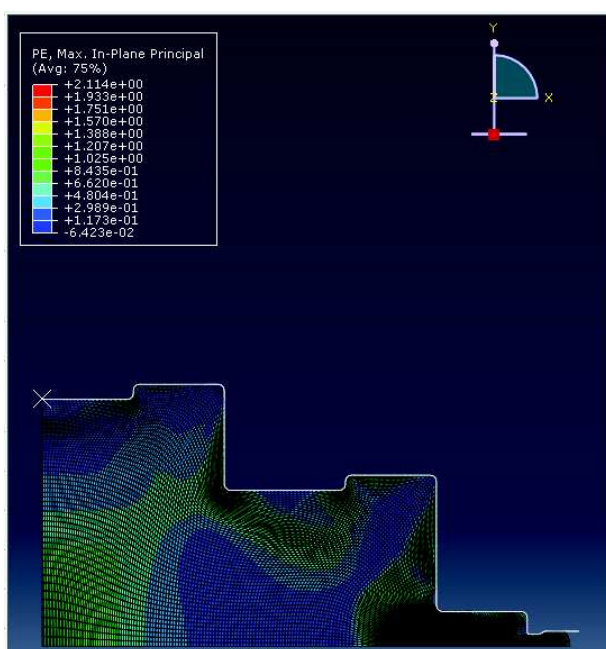


Fig. 96 Def. Máximas (3mm)

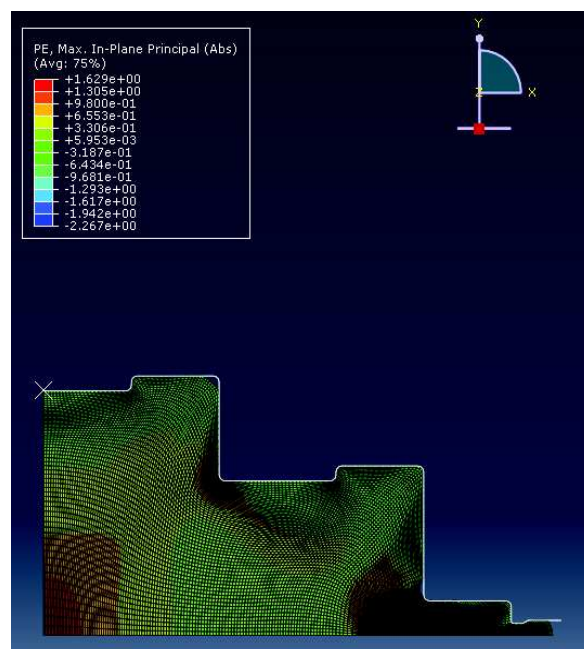


Fig. 95 Def. Absolutas máximas (3mm)

2.4 Canal de rebaba 2 mm

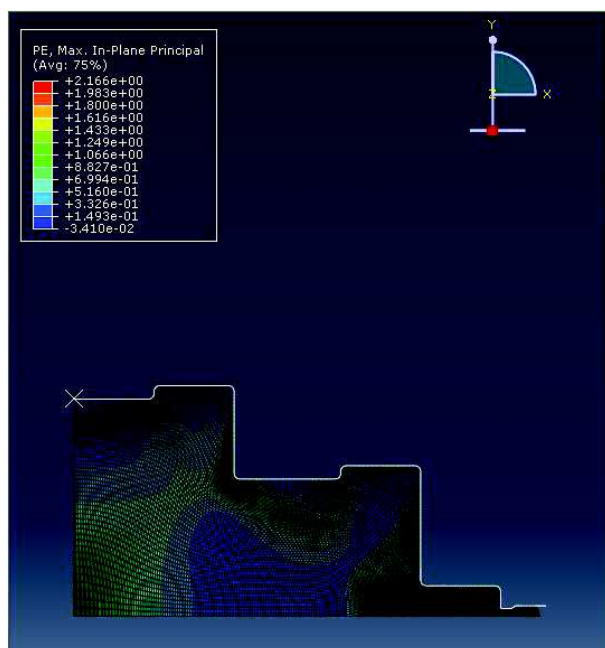


Fig. 97 Def. Máximas absolutas (2mm)

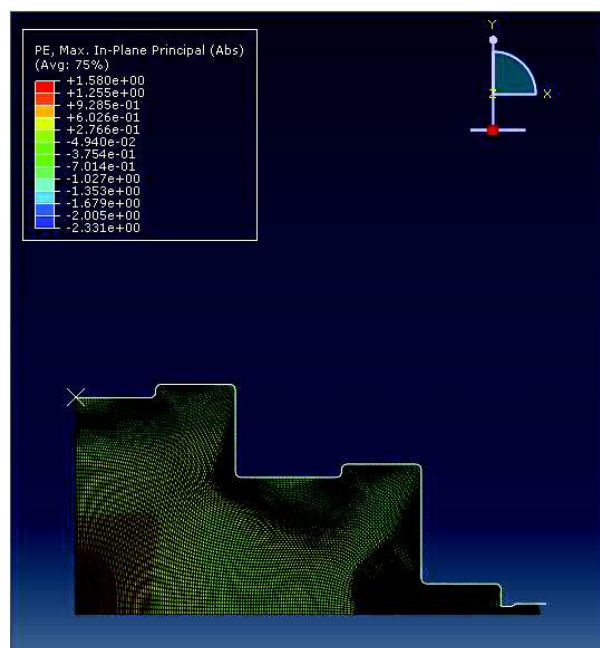


Fig. 98 Def. Absolutas máximas (2mm)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Abaqus 6.14 Documentation». [En línea]. Disponible en: <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/index.html>. [Accedido: 20-sep-2016].
- [2] «AISI 1151 Steel, Hot Rolled Bar (UNS G11510)». [En línea]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=05f11a0c720e4be19ec6f0f8f271ef99&ckck=1>. [Accedido: 14-nov-2016].
- [3] «Consideraciones de diseño para la forja cerrada con rebaba. Dr. Victor Hiram Vazquez Lasso.pdf». .
- [4] Jesus del Río, *Deformación plástica de los materiales. La forja y la laminación en caliente*. .
- [5] «Diseño de estampas para forja. Leonardo Estrada Díaz, Armando Ortiz Prado, Edgar Isaac Ramirez Díaz.pdf». .
- [6] «Dynamic hot forging of a steel connecting rod. A. Gilat, X. Wu, X. Zhang, R. Batra.pdf». .
- [7] Mario Rossi, *Estampado en caliente de los metales*. .
- [8] «Estudio sobre la influencia del rozamiento en operaciones de forja localizada-incremental mediante simulación por elementos finitos. A.M. Camacho, M.M. Marín, M.A. Sebastian.pdf». .
- [9] «Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 5ta Edición - S. Kalpakjian, S. R. Schmid www.deingenieria.com.pdf». .
- [10] «Metal Forming Simulation of Ultrafine-Grained Aluminum Alloys, Journal for Technology of Plasticity, 2014, No 39 (1), pp. 1-10.pdf». .